ENDEAVOUR

Revue trimestrielle destinée à tenir registre du progrès
des sciences au service du genre humain

VOLUME IX OCTOBRE 1950 NUMÉRO 36

La conservation des pièces de musée

«Une belle chose» a dit Keats avec raison «est une joie éternelle: sans cesse plus aimable, elle brave les injures du temps.» Mais alors il parlait en poète et non en curateur de musée ou de galerie d'art, car son affirmation interprétée littéralement s'avère radicalement fausse. Les curateurs savent trop bien que les tapisseries perdent leurs couleurs ou sont dévorées par les mites, que les peintures noircissent, que les manuscrits enluminés deviennent cassants et fragiles, que les palimpsestes deviennent de plus en plus illisibles. Autrefois on ne pouvait opposer à cette inévitable décrépitude qu'une résignation attristée.

De nos jours les perspectives sont meilleures. Nous nous rendons bien compte que les objets de valeur rassemblés dans une musée ou une galerie donnent lieu à d'autres considérations à part les recherches historiques, la documentation, les expositions, les conférences etc. Il y a aussi des problèmes essentiels de nature technique ou scientifique que nous sommes arrivés à connaître parce que la science en a résolu de semblables dans d'autres domaines: ils ont trait à l'entretien rationnel des trésors artistiques, à la recherche de tous les moyens possibles d'éliminer les causes de détérioration et là où celle-ci a déjà commencé, à y remédier de façon satisfaisante et durable. Ainsi présentés, ces problèmes réclament évidemment l'intervention de l'homme de science sans toutefois écarter la nécessité de tenir compte des canons de l'esthétique lesquels au contraire doivent être constamment respectés. Le savant a une tâche très précise: bien comprendre les considérations matérielles et en faire le point de départ d'un raisonnement objectif.

La discussion en détail des procédés n'est pas ici à sa place: rappelons seulement qu'il faut d'abord tenir compte de la structure des pièces à être conservées, et de l'influence du milieu. L'expérience des garde-meubles du temps de guerre, avec les risques qu'ils comportaient et leur condition souvent imprévisible, nous a démontré les avantages incontestables de la climatisation pour le prolongement de la durée des œuvres d'art: elle ne peut remédier aux dommages survenus mais contribue puissamment à en éliminer les causes et à éviter qu'ils se reproduisent.

Dans l'art du conservateur, comme ailleurs, les appareils et les dispositifs sont relativement inutiles sans un personnel compétent et exercé, à tous les échelons. Il n'existait pourtant guère, jusqu'à une date récente, d'organisme mondial destiné à établir des standards professionnels et à encourager la formation d'un personnel de qualité tant au point de vue de la connaissance des matériaux que de la compétence technique. Ce n'est qu'au printemps de cette année (1950) que fut fondé à Londres l'Institut International pour la Conservation des Pièces de Musée, le premier groupement de spécialistes choisis qui ait jamais été formé pour s'occuper des moyens de sauvegarder les objets précieux de toute sorte. Le nouvel institut prendra rang à la longue parmi les organisations professionnelles bien connues d'architectes, d'ingénieurs, de physiciens, de chimistes et d'autres, formées dans le même but: élever le niveau des spécialistes et maintenir, exiger au besoin, des standards élevés.

Un trait saillant de la nouvelle association est son caractère international. Il n'en pouvait être autrement, étant donné que les pièces de musée sont si universellement répandues. Ceux qui l'ont fondée, spécialistes éminents de l'art de la conservation, ont reçu de nombreux encouragements dont le plus généreux jusqu'ici provient de la Fondation Nuffield qui a garanti à l'association une subvention annuelle de £500 pendant cinq ans. Les Etats-Unis, berceau du projet, et la Belgique ont aussi apporté une aide financière; la Grande-Bretagne également en sus de la donation

Nuffield. Comme toute entreprise qui débute, le nouvel institut dispose de moyens très modestes, et doit avoir largement recours à l'aide bénévole de ses membres. Il est d'autre part souhaitable qu'une grande publicité soit donnée à ses objectifs: les milieux archéologiques de l'Inde et les spécialistes suédois ont déjà fait au projet un accueil favorable.

La gravité de la situation actuelle quant à la formation et au recrutement des conservateurs et des restaurateurs n'échappe à personne. En dépit des efforts louables des particuliers et des institutions, académiques ou autres, il reste encore à réunir dans la proportion requise, d'une part la quantité et la qualité qu'il faut d'enseignement scientifique et technique, et de l'autre la compréhension des questions d'histoire et d'esthétique qui peuvent surgir. On est arrivé loin dans cette voie au Musée Fogg à Harvard. L'Institut Courtauld à Londres possède des classes régulières, et cet été on y a fait au profit des conservateurs l'expérience d'un cours de perfectionnement que l'on espère voir se reproduire tous les ans.

Ce qu'il faudrait toutefois indépendamment de tout cela, c'est un programme de formation professionnelle portant sur tous les genres de pièces de musée et qui pourrait être accepté sur un plan international. Le nouvel institut n'a ni le droit ni le désir de régenter la profession, mais il est autorisé à décerner des diplômes en certaines circonstances et tâchera en temps et lieu de mettre en route des projets pour la formation professionnelle.

Selon Lord Rutherford, le progrès des connaissances dépend de celui de la technique; mais il faut néanmoins à celle-ci les moyens de se répandre parmi toutes les catégories d'intéressés. L'on projette de faire paraître une publication sous les auspices de l'Institut et des dispositions provisoires sont déjà en train. Le journal ne pourra pas paraître à intervalles réguliers, mais l'on se propose de publier un numéro à chaque fois qu'on aura réuni suffisamment d'éléments de premier ordre pour en composer un. Entre-temps la publication régulière à intervalles plus rapprochés d'un bulletin de dimension plus modeste sera assurée pour tenir les membres au courant de la politique générale et des activités de l'Institut.

Petit à petit un service de consultations et de conseils sera mis sur pied, afin de faciliter la collaboration avec les organismes qui exploitent les domaines voisins.

Ce sont là les grandes lignes d'un projet dont le but est d'affirmer les bases de la profession du conservateur. Le temps seul en fera voir les effets; mais la tentative en soi a son importance: un seul exemple suffit, celui, très important au reste, du nettoyage des tableaux dont la théorie et la pratique peuvent donner lieu, comme chacun le sait, à de grandes divergences d'opinion. Tous ceux qui se sont livrés à cette opération difficile et délicate admettront que c'est l'habileté du restaurateur qui compte. Sans cela, la connaissance des dissolvants, de la friction, des propriétés physiques des peintures, et tout le reste, ne servent à rien. Il en va naturellement de même en ce qui concerne la pureté des intentions et le désir de collaborer avec les autres spécialistes scientifiques et techniques afin d'augmenter l'efficacité des consultations et réduire les risques possibles.

Au point où en est cette partie de la science, aucune règle rigide ne peut être formulée, les matériaux employés étant si différents, ainsi que leurs relations entre eux. Toutefois de la finesse d'observation jointe à une manière objective de les aborder contribueraient grandement à surmonter les difficultés qui surgissent au cours des travaux de conservation.

Rédacteur en chef: E. J. HOLMYARD, M.A., M.Sc., D.Litt., F.R.I.C.
Rédacteur adjoint: TREVOR I. WILLIAMS, B.A., B.Sc., D.Phil.
Pour les éditions étrangères: J. A. WILCKEN, B.Sc., Ph.D.

Imperial Chemical Industries, Nobel House, Buckingham Gate, Londres, S.W.1.
Prière d'adresser toute correspondance à la rédaction, 26 Dover Street, Londres, W.1.

Etude physique de la déformation des métaux

E. N. DA C. ANDRADE

Les propriétés mécaniques des métaux sont largement déterminées par de petites irrégularités locales du réseau cristallin. L'auteur énumère les méthodes pour révéler la structure en grains cristallins des métaux, et donne un aperçu rapide des forces interatomiques dont dépend le comportement des cristaux métalliques sous tension. L'énorme discordance entre comportement réel et prévisions théoriques s'affirme encore plus dans le cas des monocristaux métalliques. Les monocristaux métalliques étirés ont une structure en assemblage, et l'on pense que la déformation se produit par glissement sur les plans réticulaires. Ce glissement est attribué à la propagation de dislocations, illustrée par des modèles. Les impuretés bloquent cette propagation, et durcissent le métal, et le comportement des monocristaux métalliques ne peut s'expliquer que par un système d'irrégularités de structure. Le «creep» ou fluage des métaux sous température ou pression élevée est étudié, et une équation de ce phénomène est interprétée.

C'est pour le profane un des paradoxes de la physique, que les propriétés mécaniques des corps à l'état gazeux, généralement invisibles, et qu'on ne peut manipuler que dans des récipients fermés soient tellement plus faciles à expliquer que celles des états condensés — liquides ou solides — où les corps sont visibles, palpables, et se prêtent à de nombreuses expériences simples. La raison en est, bien sûr, qu'à l'état gazeux les molécules sont dispersées. Les phénomènes complexes qu'entraîne leur rapprochement ne jouent que lors des collisions, qui sont relativement rares dans la vie d'une molécule, et ne concernent que deux, tout au plus trois molécules à la fois. Dans les états condensés, chaque molécule passe toute sa vie dans le voisinage immédiat de plusieurs autres, et le calcul des forces dominantes, où il faut tenir compte de l'interaction de plusieurs couches électroniques, devient un problème difficile, qui n'admet que des solutions approchées. A certains égards, le solide cristallisé est plus simple que le liquide, dans sa régularité structurale; aussi y a-t-il une théorie très valide de la chaleur spécifique de ce genre de solides, alors qu'on n'a pas encore pu traiter de façon satisfaisante le problème de la variation de la chaleur spécifique des liquides avec la température. Cependant, l'état solide présente une difficulté fondamentale: en général, il n'est pas en équilibre thermodynamique avec le milieu environnant, contrairement à tous les liquides usuels. C'est particulièrement vrai pour les métaux: un métal bien défini chimiquement — c'est-à-dire, soit un métal pur, soit un mélange de métaux en proportions connues — dans des conditions de température et de pression bien déterminées, peut avoir des propriétés très diverses, surtout s'il s'agit des propriétés mécaniques; son comportement dépend notablement de son histoire antérieure. Il suffira de mentionner la trempe, ou le polissage pour faire comprendre ce dont il s'agit. On concrétise ces variations en séparant les propriétés des solides, et plus particulièrement des métaux en deux classes: celles qui sont sensibles à la structure, et celles qui ne le sont pas. Ces dernières sont celles qui subissent relativement peu d'altérations sous l'effet de traces d'impuretés, ou de traitements mécaniques ou thermiques — telles sont la chaleur spécifique, les constantes réticulaires moyennes, la densité, et le coefficient de dilatation. Au contraire, perméabilité magnétique, limite d'élasticité, charge de rupture, ductilité et résistance au fluage — d'une façon générale, toutes les propriétés mécaniques d'un métal — sont sensibles à la structure. Certains aciers au manganèse de composition déterminée illustrent ceci d'une façon frappante: selon la structure produite par le traitement subi, ils peuvent être résistants, ductiles, et non magnétiques, ou durs, cassants et magnétiques.

Voilà donc une source de grandes difficultés dans l'étude des métaux: il peut y avoir de nombreuses différences structurales dans des conditions analogues: la plupart des états d'un métal sont métastables. En général, un métal dans un état

donné demeure indéfiniment dans cet état à température ambiante; mais il y a des exceptions: le cas souvent cité de l'étain blanc (ordinaire) qui tourne lentement au gris au-dessous de 18°, et les nombreux alliages, comme divers alliages d'aluminium, qui durcissent quand on les laisse à température normale, ou plus rapidement à une température élevée constante. On reviendra plus loin sur cette transformation, dite durcissement par précipitation.

Il faut donc, pour tenter d'expliquer les propriétés mécaniques usuelles des métaux, examiner leur structure. Commençons par les métaux purs. On sait que les métaux ordinaires sont une agglomération de petits cristaux, les grains cristallins, que l'on met en évidence en polissant[1] le métal, puis en attaquant la surface avec un réactif approprié, doué d'une action préférentielle sur les frontières cristallines (voir figure 1) et fréquemment sur les diverses faces cristallines, car un réactif chimique donné attaque en général les différentes faces d'un cristal avec des vitesses différentes. Hausser et Scholz [2] ont mis en lumière un cas remarquable d'attaque sélective sur une sphère tournée à partir d'un gros monocristal de cuivre, dont la préparation fut un exploit technique. Dans l'air, l'oxydation n'a lieu que sur les faces cubiques de la structure cristalline. En trempant la sphère dans de l'acide nitrique où on a dissous du mercure, on observe un dépôt de mercure sur les faces rhombiques du dodécaèdre, avec des bandes de cuivre brillantes à la séparation des faces individuelles. On voit sur la figure 5 des exemples d'attaque préférentielle sur les faces cristallines par un réactif révélateur plus usuel: c'est l'origine de l'existence de grains brillants et sombres.

Il y a une autre méthode pour révéler la structure d'un métal en utilisant une action sélective: c'est l'attaque thermique: on chauffe le métal, jusqu'à vaporisation des couches superficielles. C'est ainsi que Chalmers et ses collaborateurs ont étudié la structure de l'argent polycristallin [3] et que j'ai étudié moi-même avec Randall, les irrégularités locales de monocristaux de cadmium [4]. Chalmers et ses collaborateurs ont aussi étudié l'attaque par les gaz des métaux chauffés: l'oxygène, par exemple, est un révélateur particulièrement efficace des structures. On voit sur la figure 3 une surface d'argent attaquée par l'oxygène à 900°, avec des macles sans tension, et sur la figure 4, de l'argent révélé thermiquement à l'air, avec les limites des grains, aussi bien que des structures intérieures du grain.

On a longtemps débattu la nature des frontières intercristallines: pour une école, les grains sont séparés par une région de l'épaisseur d'environ cent atomes, où les atomes sont disposés sans ordre: c'est le «ciment amorphe». Pour l'autre, entre deux grains, où prédomine un ordre cristallin se trouve un feuillet, épais seulement de quelques atomes, dont les atomes, soumis à des forces issues des deux réseaux, constituent une couche de transition. C'est là l'opinion la plus courante et, tout récemment, Chalmers et ses collaborateurs, par des considérations d'énergie libre appliquées aux frontières cristallines l'ont appuyée d'arguments solides [5].

Donc, dans un métal polycristallin, il faut tenir compte à la fois, des grains cristallins et des frontières cristallines. De plus, souvenons-nous que, pour un métal donné, les dimensions moyennes des grains peuvent varier considérablement, suivant le traitement, et que des traces même infimes d'impuretés — impossibles à éliminer totalement — peuvent se diffuser de façon préférentielle vers les frontières cristallines, où leurs proportions deviennent appréciables, par suite du petit nombre relatif des atomes en ces points. Là encore, nous le verrons, les déformations mécaniques peuvent influer beaucoup sur la structure même des grains. Il doit donc être clair qu'un métal, même pur spectralement, est un assemblage très complexe. Cependant, les divergences entre ses propriétés mécaniques et les prévisions théoriques simples sont encore plus grandes que ne le suggèrent ces premières considérations structurales.

Considérons le cristal idéal le plus simple. Soient seulement deux atomes: ils sont en équilibre sous l'effet d'une force attractive qui tend à les rapprocher, et d'une force répulsive qui les empêche de se rapprocher indéfiniment: cette dernière décroît bien plus vite que l'attraction avec accroissement de la distance, si bien qu'il y a équilibre en E (figure 20), quand les deux sont égales. Dans le réseau complet, l'allure générale des forces s'en rapproche beaucoup. Si l'on applique un effort au réseau, pour séparer les atomes, l'attraction croît donc jusqu'à son maximum, M, puis le métal se brise. Jusqu'à ce point, le réseau idéal devrait être élastique, et recouvrer dimensions et forme initiales après suppression de l'effort. On aurait donc de grandes déformations parfaitement élastiques, en contradiction avec la loi de Hooke.

[1] Récemment, on a largement utilisé le polissage électrolytique, au lieu du polissage mécanique. Il évite de briser la structure de la surface cristalline, qui subit des altérations mécaniques considérables au cours du polissage mécanique.

De plus, on peut calculer de façon approchée la charge de rupture des cristaux. Le seul cas où l'on connaisse assez bien les forces interatomiques pour le faire à partir des données réticulaires est celui des cristaux ioniques simples, du type sel gemme. Le calcul conduit alors à prévoir une rupture sous tension pour un allongement de 14%, sous une charge d'environ 250 kg/mm². Il existe une méthode plus générale pour déterminer la résistance théorique, fondée sur le calcul de la variation d'énergie lors de l'apparition d'une nouvelle surface, quand une tige est brisée sous tension. La valeur de l'énergie de surface se déduit de la tension superficielle, calculée à son tour à partir de la tension superficielle du liquide. On admet que les énergies de surface des formes liquides et solides sont très voisines puisque les distances interatomiques changent peu à la fusion. Appliquée au sel gemme, cette méthode donne un résultat du même ordre que la précédente: appliquée aux métaux, elle conduit à des charges de rupture d'environ 3000 kg/mm². Or, la tension de rupture du sel gemme est de 0,5 kg/mm², tandis que pour les métaux, la limite élastique atteint rarement 50 kg/mm², et la charge de rupture deux fois cette valeur. La résistance d'un métal, quel que soit sa définition, atteint même pour les aciers les plus durs, à peine un trentième de ce que prévoit la théorie pour un cristal parfait. On trouve un écart analogue pour la résistance au cisaillement. Ce n'est pas là la seule divergence entre le comportement des métaux réels et les prévisions théoriques. En général, le domaine d'élasticité parfaite est très réduit: le métal ne se fractionne pas en se cassant, mais il y a une grande déformation plastique, au cours de laquelle le métal durcit («durcissement au travail»). Soumis à des températures et des efforts élevés, le métal sous tension ne garde pas ses dimensions initiales, mais «flue» lentement. La cassure des métaux est un sujet particulièrement compliqué, comme il ressort de l'étude récente d'Orowan [6]. Le facteur cassant de certains aciers, connu maintenant du public à la suite de la rupture de la coque de bateaux soudés, n'en est qu'un aspect particulier, et on sait que dans ce cas jouent de petites variations dans la composition de l'acier.

D'abord, on pourrait attribuer ces anomalies à la structure non monocristalline du métal, où se trouve une multitude de petits cristaux séparés par les zones limites mentionnées ci-dessus: ces zones limites pourraient raisonnablement être une source de fragilité. Mais, depuis quelques dizaines d'années, on a pu réaliser des échantillons métalliques dits «monocristal», où la direction des axes cristallographiques, déterminée aux rayons X, reste partout la même. On peut les réaliser de divers façons: tension et chauffages alternés de l'échantillon (méthode de Carpenter et Elam, surtout pour les échantillons plats); solidification systématique du métal fondu, enfermé dans un récipient, à partir d'une extrémité (Tammann, Hausser et Scholz, et d'autres); fusion locale du métal par un four mobile (Andrade et Roscoe). Ceci seulement à titre d'exemple: on a employé bien d'autres méthodes. On prépare en général ces monocristaux sous forme de fils ou de tiges qui, examinés superficiellement, pourraient paraître polycristallins; mais la permanence de direction des axes cristallographiques se démontre facilement aux rayons X. On voit ainsi sur la figure 2 un diagramme de Laue par réflexion d'un monocristal d'or, comparé à celui d'un échantillon polycristallin. On peut donc faire les essais habituels, sur des échantillons de même forme et mêmes dimensions, soit monocristallins, soit polycristallins.

Or, ce qui est étrange, c'est que le comportement des monocristaux s'écarte encore plus des prévisions théoriques simples que celui des métaux polycristallins usuels. D'ordinaire, les grandes déformations plastiques apparaissent sous des charges bien inférieures à celles nécessaires avec les métaux polycristallins; dans les quelques cas où il y a fracture brisante (en particulier avec le bismuth sous certaines conditions) la charge de rupture est très basse, de l'ordre de 1 kg/mm². La déformation produit en général un grand durcissement. Deux choses, pourtant, sont frappantes: un fil monocristallin, étiré, présente une structure en bandes caractéristique, comme pourrait en produire le glissement l'un sur l'autre d'une série de plans parallèles, faisant un angle déterminé avec l'axe du fil. De plus, le fil étiré s'aplatit, et la section transversale, de circulaire, devient elliptique. On voit sur la figure 7 un monocristal de cadmium, étiré d'environ 40%. Cette structure en escaliers n'est pas due à une impureté. De tous les métaux c'est probablement le mercure qu'on peut obtenir le plus pur: les monocristaux étirés de mercure aussi pur que possible — à l'état solide, cela va sans dire, donc, à basse température — présentent l'aspect en bandes typique, avec une grande netteté (figure 8). L'aplatissement est illustré par la figure 10. On voit un monocristal de cadmium, étiré d'environ 140%, dans deux directions perpendiculaires (toutes deux normales à l'axe du fil).

L'aplatissement, et les variations du cisaillement critique nécessaire pour amener un début de déformation plastique avec l'angle des axes cristallographiques et de l'axe du fil, peuvent s'expliquer en admettant que la déformation se produit par glissement sur certains systèmes de plans réticulaires, et dans une direction particulière du cristal. Prenons comme exemple le cas, particulièrement simple des métaux qui cristallisent dans le système hexagonal. Le plan dit «de glissement», est alors le plan de base du système hexagonal, qui est unique, en contraste, par exemple, avec les plans octaédraux dans un cristal cubique à face centrée, dont il y a quatre systèmes équivalents. Dans le plan de glissement se trouvent trois directions équivalentes de glissement, celles des axes diagonaux, *OC*, *OD*, *OE* (figure 21): celle qui jouera sera la plus proche de la projection *OA* de l'axe du fil sur le plan, donc *OD* sur le schéma. Le glissement commencera quand la composante de la tension dans le plan de glissement sur la direction de glissement aura atteint une certaine valeur s, le cisaillement critique pour le métal envisagé. Soit donc A la surface de la section normale du fil, F la force appliquée dans la direction de l'axe du fil, et χ et λ les angles respectifs du plan de glissement et de la direction de glissement avec l'axe du fil, la condition pour qu'il y ait déformation plastique sera:

$$(F/A) \sin \chi \,.\, \cos \lambda = s.$$

Dans les cristaux cubiques à face centrée, les plans de glissement sont les plans octaédraux, tels *AED* avec trois directions de glissement — *MN*, *PQ*, *RS* — dans chacun, parallèles aux arêtes triangulaires des plans (figure 22). On entrevoit alors la possibilité d'orientations pour lesquelles le glissement peut se produire aussi bien dans deux, ou même trois plans équivalents, comme dans le cas des monocristaux de mercure (figure 11) ou d'or (figure 13). Le cisaillement critique ainsi défini varie de 25 g/mm² à 1000 g/mm² pour une série de métaux allant du cadmium au nickel, alors que le cristal parfait sous tension devrait, théoriquement, se comporter de façon parfaitement élastique jusqu'à un allongement de 50%, et se rompre à 100 kg/mm² ou plus. De plus, on trouve expérimentalement qu'avec les monocristaux, la déformation permanente s'accompagne d'un très grand durcissement. Le cas de l'argent est particulièrement frappant: d'après des mesures faites dans mon laboratoire, il commence à se déformer pour une tension critique de 54 g/mm², et se brise, après un glissement de 95% pour 4500 g/mm². Ainsi, d'une façon générale, le comportement des monocristaux est encore plus aberrant que celui des métaux polycristallins. Une autre question se pose, dès que l'on examine un monocristal étiré: le glissement se produit en couches ou «paquets», comme on dit souvent, ce qui signifie que certains plans d'un système où tous seraient équivalents dans un cristal parfait, ont une tendance toute particulière à glisser. L'épaisseur de ces paquets glissants à température ambiante, est de l'ordre de 1 μ, mais on a montré que cette épaisseur s'accroît beaucoup à température élevée. On voit, par exemple, sur la figure 14, les paquets glissants très grossiers obtenus avec le molybdène à 1000°. Le glissement, dans les régions très étroites qui séparent les paquets est très important: au microscope électronique, Heidenreich et Shockley [7] ont montré que pour l'aluminium, les strates, (invisibles au microscope ordinaire) qui constituent le plan de glissement, ont environ 200 Å d'épaisseur (à peu près 70 diamètres atomiques) et qu'elles peuvent se déplacer de 2000 Å l'une par rapport à l'autre.

On peut expliquer la fragilité anormale, et la possibilité d'obtenir des déformations permanentes importantes qui caractérisent les monocristaux métalliques en admettant l'existence de fissures dans la structure, anomalies du réseau cristallin parfait. On les appelle maintenant en général «dislocations»; on appréciera la justesse de ce terme en se souvenant qu'il se rapporte simplement au déplacement d'une chose à partir de sa position normale. La dislocation la plus simple dans un réseau, de l'espèce introduite par Taylor dans ses recherches théoriques sur la résistance métallique, peut se mettre en évidence sur un modèle à deux dimensions, illustré par la figure 23. Les rangées supérieures représentent symboliquement un réseau presque parfait. A la septième rangée en descendant, il y a une dilatation locale de l'espacement atomique, d'où résulte une malformation, ou dislocation, centrée sur le point marqué par une flèche, avec une irrégularité correspondante de la surface cristalline, représentée par les atomes de l'extrême-gauche. Par suite de la modification des forces atomiques qu'entraînent les positions anormales, l'atome marqué est maintenu moins fermement que dans le réseau normal, et on peut le mouvoir latéralement par une poussée horizontale relativement faible, qui entraîne les atomes voisins, si bien que c'est l'atome suivant qui devient le centre de la dislocation, et cède à son tour sous une poussée faible, et ainsi de suite, la dislocation se propageant sur une ligne horizontale.

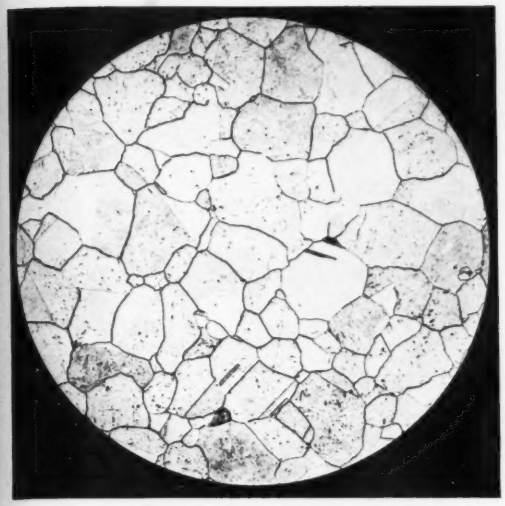
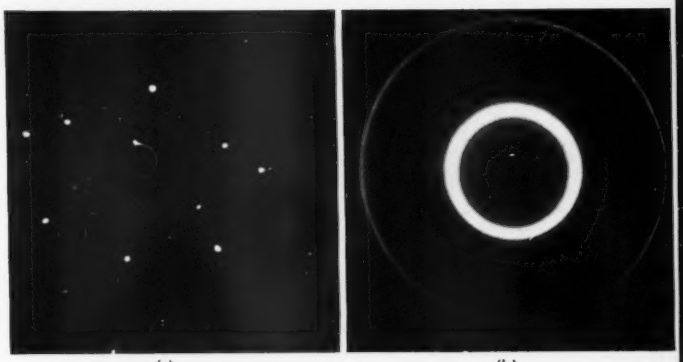


FIGURE 1 – *Plomb polycristallin avec dessin des frontières cristallines.* (× 9)
(Due à l'amabilité de la British Non-Ferrous Metals Research Association.)



(a) (b)

FIGURE 2 – *Photographie par réflexion aux rayons X d'un fil d'or:* (a) *monocristallin* (b) *polycristallin.*
(Photographié par M. C. Henderson, Carey Foster Laboratory.)

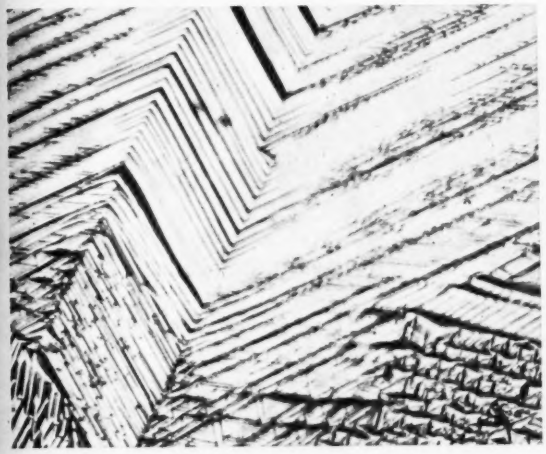
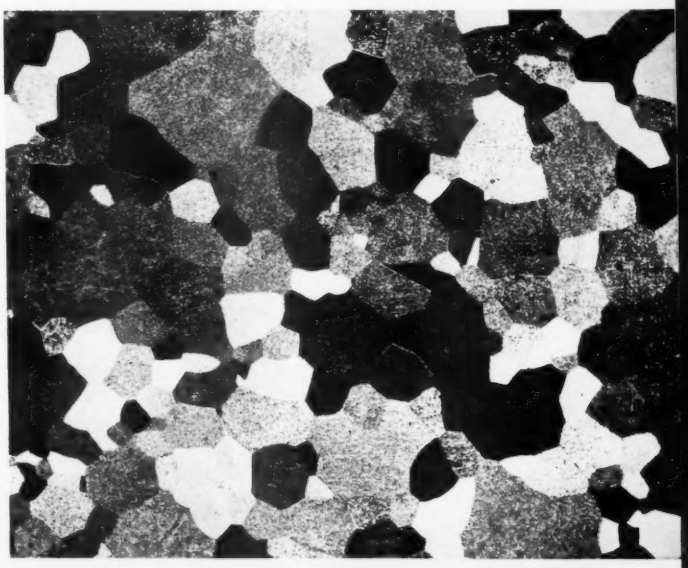


FIGURE 3 – *Argent révélé thermiquement dans l'oxygène.* (× 1500)
(Photographié par M. R. King.)



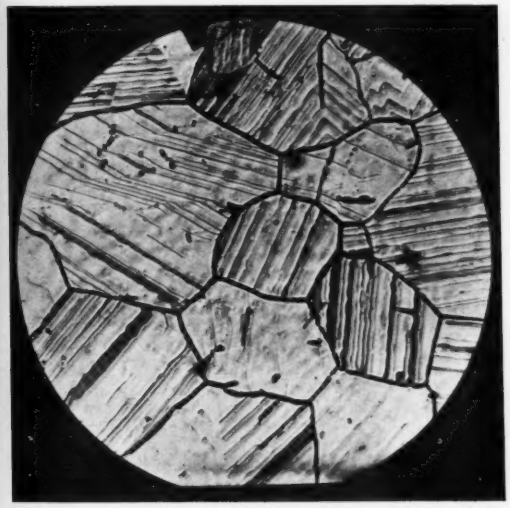


FIGURE 4 – *Argent révélé thermiquement dans l'air.* (× 540)
(Photographié par M. L. Walden, Carey Foster Laboratory.)

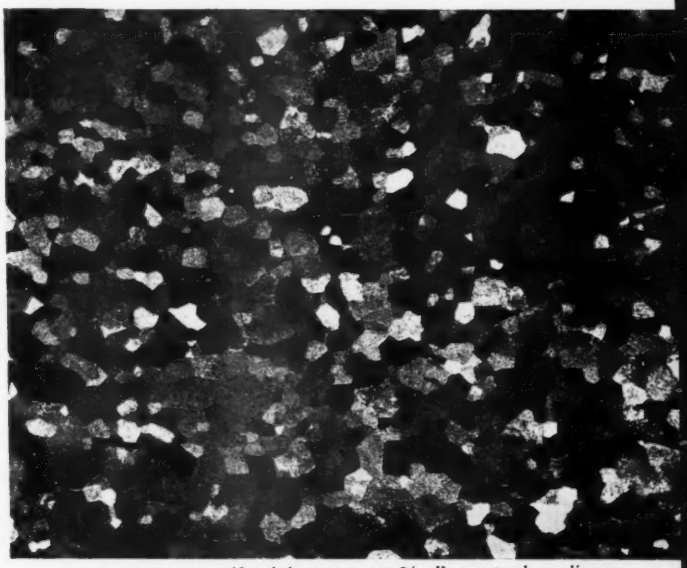


FIGURE 5 – *Aluminium avec 0,5% d'argent: deux dimensions différentes de grains au sein d'un même métal.* (× 10)

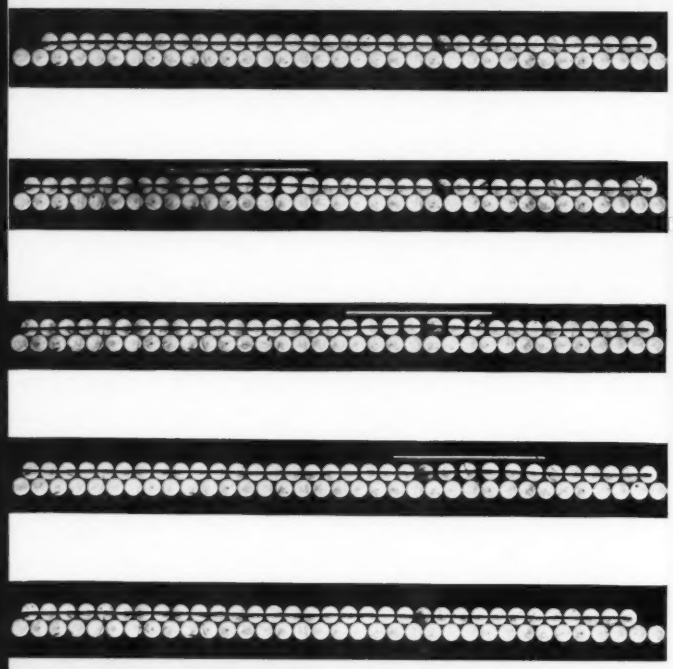


FIGURE 6 – *Modèle pour illustrer la propagation d'une dislocation linéaire.*

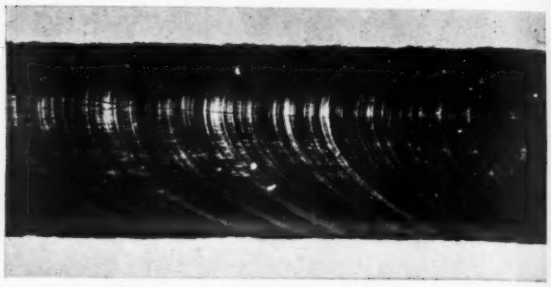


FIGURE 7 – *Monocristal de cadmium, étiré de 40%.* (× 30)
(Photographié par M. L. Walden, Carey Foster Laboratory.)

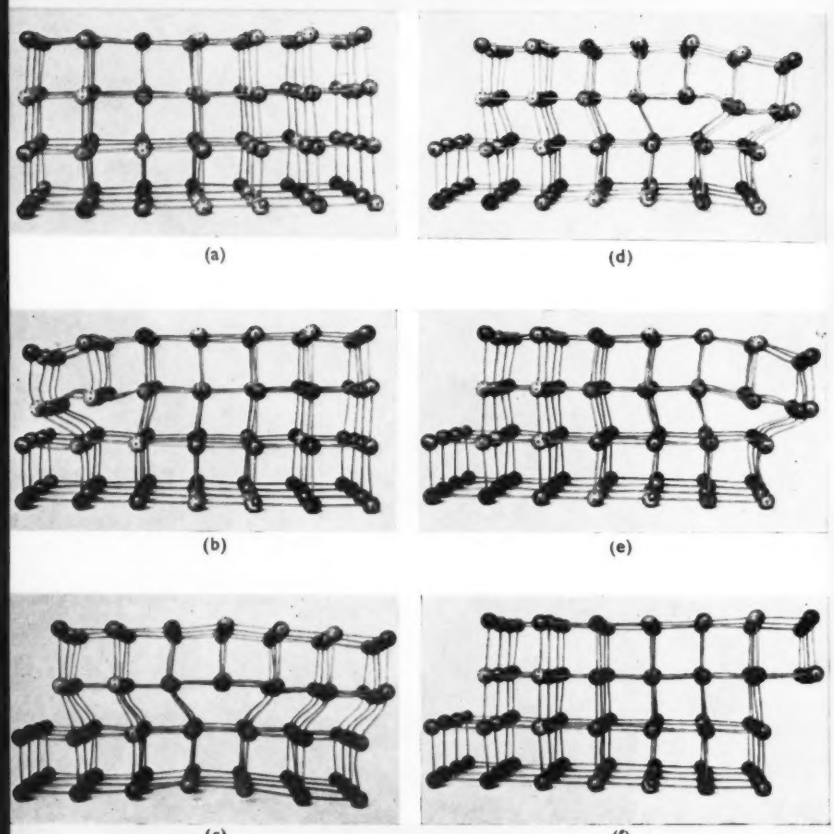


FIGURE 9 – *Modèle tridimensionnel de dislocation linéaire.*
(Dû à l'amabilité de M. B. A. Bilby, et de l'Institute of Metals.)

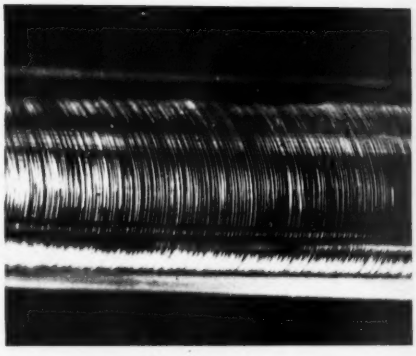


FIGURE 8 – *Monocristal de mercure étiré.* (× 16)
(Photographié par M. K. M. Greenland, Carey Foster Laboratory.)

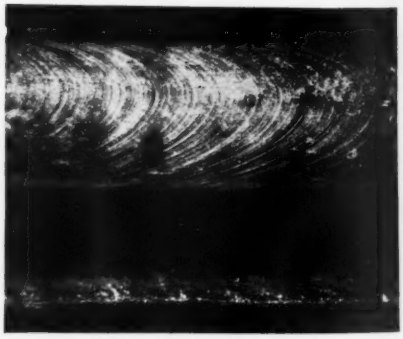
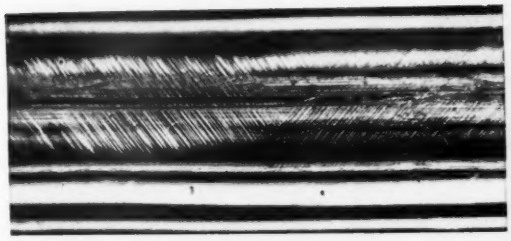
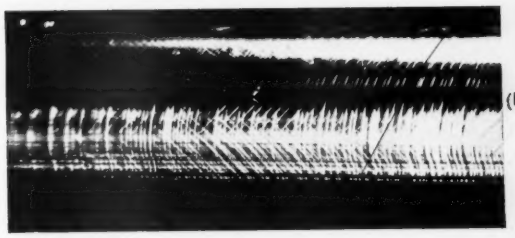


FIGURE 10 – *Monocristal de cadmium étiré de 140%, reposant sur le plat et sur l'arête.* (× 22)
(Photographié par M. L. Walden, Carey Foster Laboratory.)

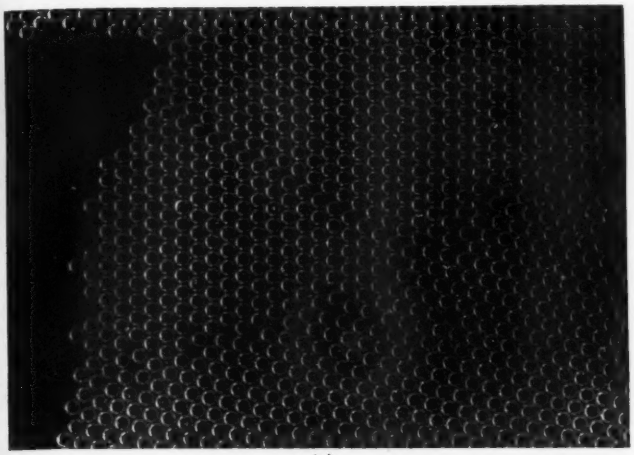
FIGURE 11 – (a) *Glissement double,* (b) *glissement triple, sur un monocristal de mercure.* (× 16)
(Photographié par M. K. M. Greenland, Carey Foster Laboratory.)



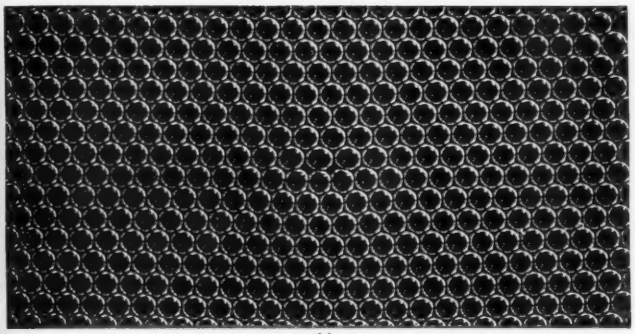
(a)



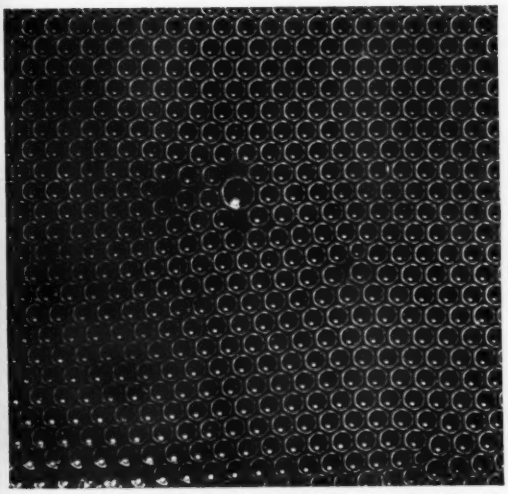
(b)



(a)



(b)



(c)

FIGURE 12 – *Modèle à bulles:* (a) *une frontière de grain cristallin* (b) *une dislocation, au milieu de la photographie* (c) *effet d'un atome étranger plus grand.*
(Dû à l'amabilité de Sir Lawrence Bragg, de M. J. F. Nye et de la Royal Society.)

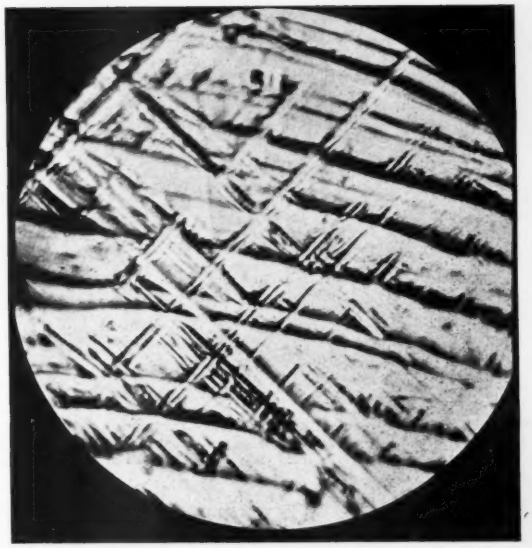


FIGURE 13 – *Triple glissement sur un monocristal d'or.* (× 1800) *(Photographié par M. C. Henderson, Carey Foster Laboratory.)*

FIGURE 14 – *Gros paquets de glissement sur monocristal de molybdène à* 1000°. (× 65)
(Photographié par M. L. C. Tsien et Y. S. Chow, Carey Foster Laboratory.)

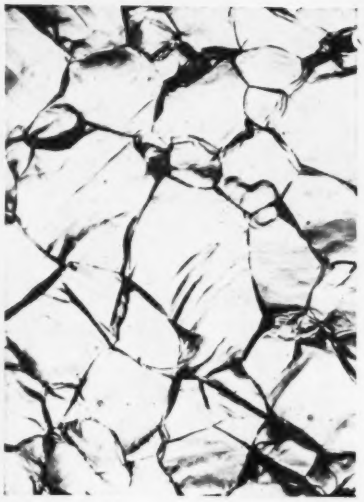
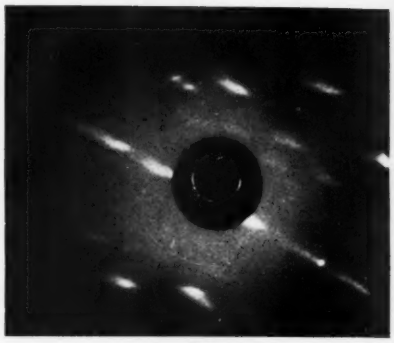


FIGURE 15 – *Aluminium (à gauche) après un étirage rapide de 9% à 200°, (à droite) après un étirage rapide de 8% à 500°.* (× 100)

(Dû à l'amabilité de M. A. Wood et A. Rachinger et de l'Institute of Metals.)

(a)



(b)

FIGURE 16 – *Diagrammes de Laue par réflexion d'un monocristal d'argent,* (a) *non étiré,* (b) *très étiré.*

(Photographié par M. C. Henderson, Carey Foster Laboratory.)

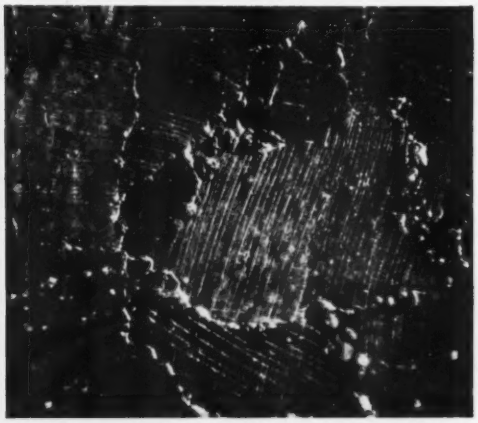


FIGURE 17 – *Lignes de glissement sur des grains de plomb polycristallins.* (× 60)

(Photographié par M. K. H. Jolliffe, Carey Foster Laboratory.)

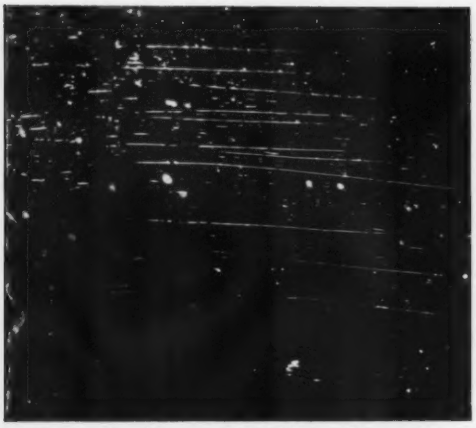


FIGURE 18 – *Fissures de Griffith, sur du verre Pyrex, révélées par l'attaque à la vapeur de sodium.* (× 14)

(Photographié par le professeur E. N. da C. Andrade et M. L. C. Tsien.)

FIGURE 19 – *Glissement dans le plomb recristallisé, avec les anciennes frontières cristallines.*

(Photographié par M. K. H. Jolliffe, Carey Foster Laboratory.)

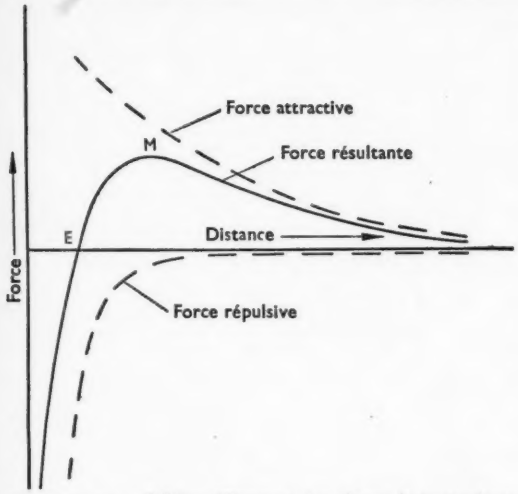


FIGURE 20 – *Schéma illustrant les forces interatomiques.*

Pour illustrer le passage d'une dislocation, caractère fondamental de toutes les théories modernes de la déformation et du durcissement des cristaux métalliques, j'ai bâti autrefois un modèle articulé, qu'illustre la figure 6 [8]. Sur la photographie, les disques blancs sont les extrémités de cylindres de bois, d'environ 75 mm de diamètre. La rangée inférieure est fixée, la rangée supérieure repose dessus, chaque cylindre dans un creux de potentiel (de gravitation). Les cylindres de la rangée supérieure sont aussi reliés par une bande élastique noire, attachée au centre de chaque cylindre, pour figurer les forces interatomiques horizontales. Quand la rangée supérieure, comme dans la figure d'en haut, est disposée de façon compacte, il est impossible de la déplacer simplement en la poussant, d'un espacement sur la rangée inférieure: il faudrait faire monter tous les cylindres simultanément sur les rebords des cavités dans lesquelles ils reposent. Supposons qu'il y ait une dislocation, indiquée par l'espacement accru sous la ligne blanche dans la deuxième figure à partir d'en haut. Le cylindre moyen de la dislocation n'est plus du tout dans un creux, et l'on peut très facilement le mouvoir d'un espacement à gauche, ce qui déplace le centre de la dislocation d'un espacement à droite. Sur les troisième et quatrième figures, on voit le déplacement de la dislocation produit en passant la main sur les cylindres. Sur la dernière photographie en bas, la dislocation a atteint l'extrémité, et toute la rangée se trouve déplacée d'un espacement.

Bilby [9] a réalisé d'excellents modèles à trois dimensions pour illustrer divers types de dislocation. On voit, sur la figure 9, la série représentant le déplacement de la dislocation linéaire simple que nous avons considérée: *a* représente le réseau parfait, *b* le réseau avec une dislocation linéaire vers la gauche; *c*, *d*, *e*, diverses étapes du déplacement; *f*, représente l'état final après le déplacement de la dislocation.

Sir Lawrence Bragg et Nye [10] ont perfectionné une méthode spectaculaire pour illustrer de nombreuses propriétés des cristaux métalliques. Chaque atome est représenté par une bulle isolée, dans des «radeaux» de petites bulles très uniformes, produits d'une façon spéciale. On voit sur la figure 12 des exemples du modèle à bulles, (*a*) la frontière d'un grain cristallin, (*b*) une dislocation et (*c*) la perturbation causée au réseau par un gros atome (étranger).

Cette conception du glissement par déplacement d'une dislocation explique la malléabilité des monocristaux métalliques, et aussi pourquoi les systèmes polycristallins sont plus durs, et en

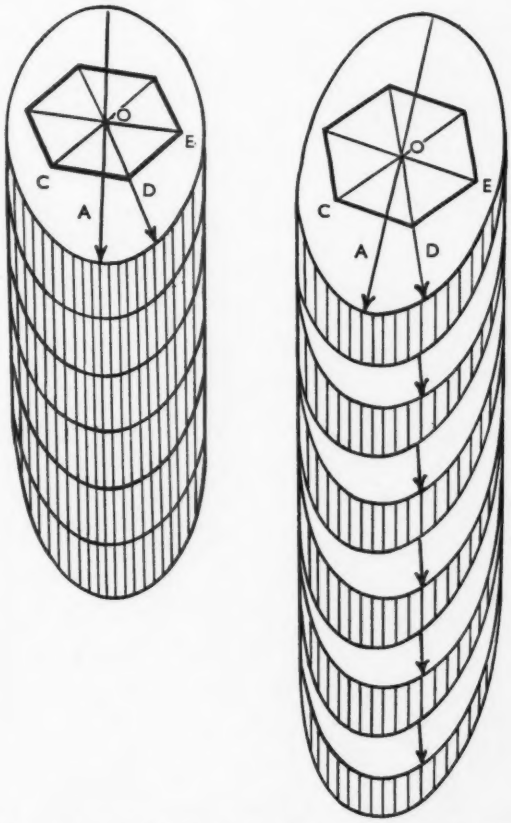


FIGURE 21 – *Schéma illustrant l'étirement d'un fil métallique monocristallin du système hexagonal.*

général, un métal à grains très fins se déforme moins facilement qu'un métal à grains plus grossiers. Pour qu'une dislocation puisse se propager, il faut une structure déjà assez régulière, puisque le centre de la perturbation doit se déplacer sans changement d'un endroit à l'autre. L'interruption dans la régularité de la structure cristalline à la limite du grain arrête la propagation de la dislocation. On voit bien sur la figure 17 les lignes de glissement à l'intérieur des grains d'un métal polycristallin, et leur arrêt à la limite. Tout manque d'homogénéité dans un métal peut aussi le durcir, en arrêtant la propagation de la dislocation. Ainsi, le durcissement des monocristaux sous l'effet d'impuretés peut s'expliquer par des tensions locales produites par des atomes étrangers, comme l'illustre la figure 12 (*c*), qui arrêtent l'extension de la dislocation. L'effet mécanique de la précipitation à partir d'une solution solide sursaturée de particules qui ne s'intègrent pas au réseau cristallin — ce que l'on appelle: durcissement par précipitation — a été attribué à ces tensions locales. Mott et Nabarro [11] ont élaboré une théorie mathématique du phénomène.

Un grand problème de l'état monocristallin est le durcissement marqué qui se produit toujours sous tension permanente. Le cisaillement critique s'accroît à mesure que le cristal se déforme par glissement, à des températures pas trop élevées — et, on peut adopter comme règle approximative que c'est le rapport de la température au point de fusion qui importe, lorsqu'on parle de température élevée ou basse. Il y a de fortes preuves que ce

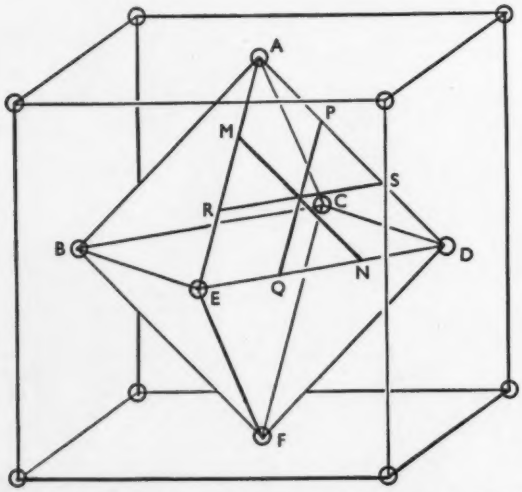


FIGURE 22 – *Eléments de glissement dans un métal du système cubique à face centrée.*

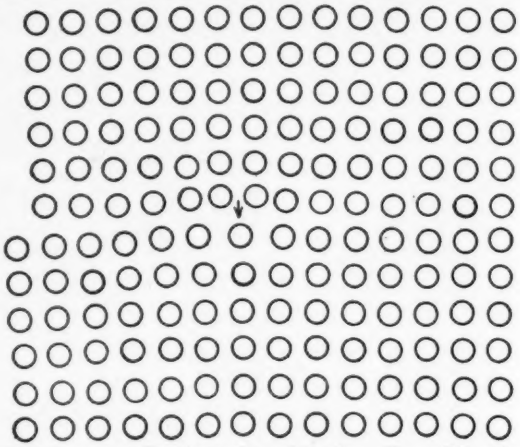


FIGURE 23 – *Représentation schématique d'une dislocation linéaire.*

durcissement accompagne des lacunes locales de la structure monocristalline. Avec les cristaux étirés sous tension, on n'obtient plus des taches de Laue distinctes, comme sur les figures 2*a* et 16*a*, mais chaque tache s'allonge en un trait. Cet allongement, dû à l'existence dans le cristal de plans ayant tourné d'un petit angle à partir de la position normale s'appelle astérisme: on en voit un exemple sur la figure 16*b*. On a montré que le durcissement est proportionnel à l'étalement angulaire indiqué par l'astérisme. Le durcissement sous tension des monocristaux est donc dû à ce qu'ils perdent quelque chose de leur structure monocristalline, avec création consécutive d'obstacle à la propagation des dislocations.

L'effet décrit par Rehbinder, qu'un agent tensioactif (comme l'acide oléique) favorise le fluage qu'il attribuait à la pénétration du liquide dans de minuscules fissures, semble dû à la désintégration de l'oxyde superficiel. Nous avons trouvé que l'aptitude à couler de monocristaux ordinaires de cadmium est accrue par contact de la surface avec des électrolytes contenant l'ion cadmium, mais si on a nettoyé la surface du fil par chauffage sous vide jusqu'à ce qu'il y ait eu une vaporisation intense, cet effet disparaît [12]. Le chauffage à l'air d'un monocristal de cadmium, pour produire une légère oxydation superficielle élève le cisaillement critique. Bref, toute une série d'observations indique qu'il est possible que la plupart des dislocations, sinon toutes, partent de la surface, et qu'une contamination quelconque par oxydation, tend à diminuer leur efficacité.

Il y a un effet dont il faut tenir compte dans de nombreux problèmes de résistance métallique,

mis en lumière par A.A. Griffith. La théorie mathématique de l'élasticité montre que dans un solide, la tension aux extrémités d'une fissure ou crevasse dépasse beaucoup la tension moyenne. En particulier, pour une fissure de section elliptique, de grand et petit axes respectivement a et b, la tension maxima, au voisinage de la portion elliptique de courbure maxima, est $\sigma\ (1 + 2a/b)$, σ désignant la tension à grande distance dans le solide. C'est pourquoi, en particulier, tout ce qui ressemble à une fissure superficielle peut provoquer une tension locale très élevée, pourvu — on l'oublie souvent — qu'on puisse considérer le matériau comme un solide élastique. La déformation plastique locale, évidemment, rend le calcul complètement faux. On n'a pas pu prouver l'existence de fissures invisibles au microscope à la surface des métaux, mais Andrade et Tsien [13] ont montré qu'on peut les révéler sur du verre par attaque à la vapeur de sodium et d'autres façons (voir figure 18). On appelle d'ordinaire ces minuscules fissures des «élévateurs de tension»; si leur finesse est de l'ordre atomique, elles peuvent provoquer d'énormes tensions locales. Les fissures visibles au microscope jouent un grand rôle dans la rupture à la fatigue des métaux industriels. S'il existe des fissures de Griffith à la surface des monocristaux métalliques, qui soient l'origine de dislocation, on comprend facilement l'effet important des revêtements d'oxyde, et choses analogues, car ils peuvent fermer efficacement ces fissures étroites. Une répartition de fissures de Griffith de gravité variable à la surface peut aider à expliquer le glissement par paquets, qui se produit plutôt qu'un glissement uniforme sur tous les plans cristallographiques équivalents. C'est une question compliquée, mais il y a beaucoup de preuves de l'existence de pailles espacées d'environ 1μ (un millième de millimètre), dans les monocristaux métalliques. Les stries dans les grains des cristaux d'argent des figures 3 et 4, révélées par l'évaporation thermique, par exemple, présentent à peu près cet écartement, tout comme les bandes de glissement dans la plupart des métaux à des températures pas trop élevées, et aussi certaines figures révélées dans l'attaque thermique de monocristaux de cadmium [4]. Straumanis a montré que les cristaux de cadmium, formés à partir de la vapeur (ou d'autre façon) se déposent en couches dont l'épaisseur est de l'ordre de 1μ. La relation entre charge et tension pour les monocristaux, même pour ceux doués d'un seul système de plans de glissement est une chose compliquée. On a invoqué pour l'expliquer, l'interaction des concentrations locales de tension causées par les irrégularités du réseau. Bref, le comportement mécanique des monocristaux métalliques, même spectralement purs, ne peut s'expliquer qu'en faisant intervenir un système de pailles dans la structure cristalline.

Quand le comportement de monocristaux soumis à des systèmes de tension relativement simples est déjà si compliqué, il n'est pas surprenant que les problèmes de métallurgie pratique, où il s'agit de systèmes polycristallins à nombreux éléments, sous des tensions complexes comme celles que produit par exemple le laminage, soient extrêmement difficiles à analyser théoriquement. Il n'est pas question d'en rendre compte ici. Bornons-nous à parler d'un problème qui a pris récemment une grande importance technique, celui du fluage des métaux, sous des tensions et des températures élevées. La turbine à gaz sous toutes ses formes nécessite des aciers qui, aux températures employées ne doivent pas couler systématiquement sous les efforts produits par les vitesses de rotation élevées. Même dans l'emploi pratique de l'énergie nucléaire, intervient le fluage des métaux.

On a effectué la plupart des expériences sur le fluage avec des tiges cylindriques sous tension. Si la tension est appliquée au moyen d'une charge constante, la diminution de section corrélative de l'allongement de la tige entraîne un accroissement de tension avec le temps: autre complication. On a employé divers procédés pour maintenir une tension constante en diminuant la charge automatiquement [14]. Dans ces conditions, les courbes obtenues pour le plomb (figure 24) sont caractéristiques pour une série de métaux purs. A basse température (— 180°), il y a immédiatement un grand allongement, suivi d'un accroissement de longueur à un rythme lent, qui diminue et enfin s'annule. A une température un peu plus élevée (— 78°), l'écoulement est plus marqué, mais finit toujours par devenir insignifiant. A température ambiante, la vitesse d'écoulement est bien plus grande, et tend à devenir constante, tandis qu'à température élevée (160°), l'essentiel de la courbe de fluage révèle une vitesse constante. Les courbes de la figure 24 se rapportent seulement à de petites durées de fluage, mais les lois qu'on va donner se vérifient pour des durées bien plus grandes. On a donné les courbes relatives au plomb, mais elles sont bien représentatives de tous les métaux purs étudiés systématiquement: ainsi le fluage du fer à 450° ressemble à celui du plomb à 16°, et le fer à 16° se comporte comme le plomb à — 180°.

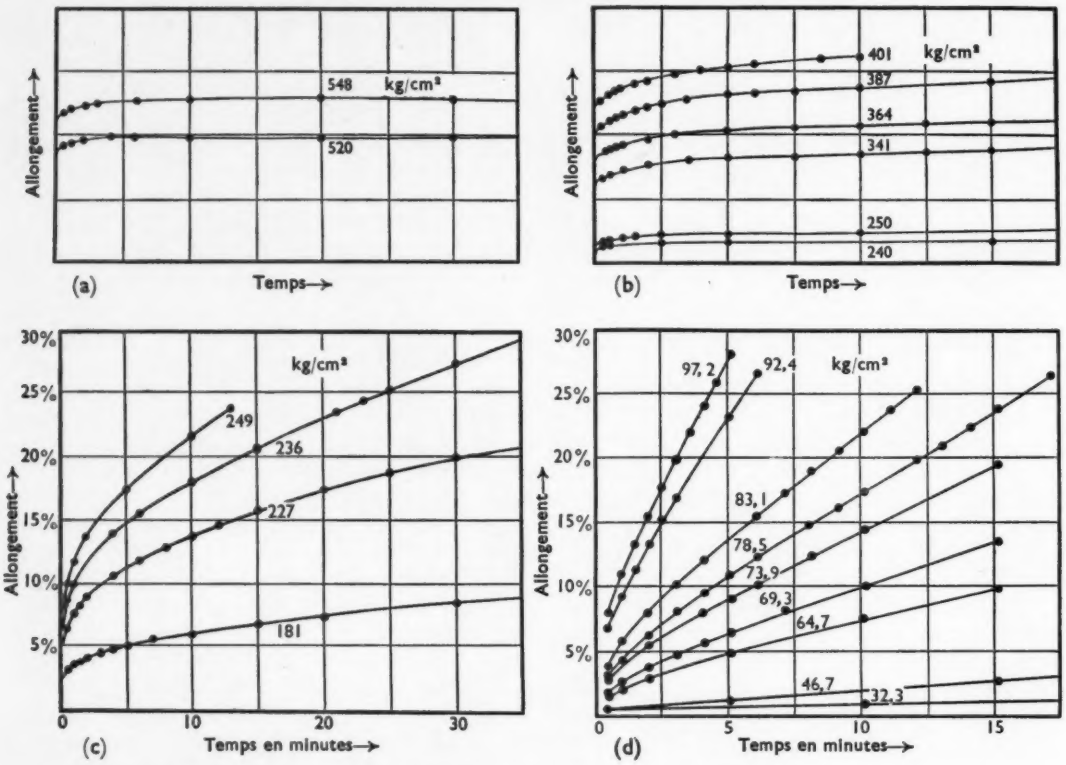


FIGURE 24 – *Fluage dans le plomb polycristallin sous diverses tensions et températures:*

(a) – 182°: *pas de fluage permanent.*
(b) – 78°: *pas de fluage permanent.*
(c) 17°: *fluage transitoire et fluage permanent.*
(d) 160°: *prédominance du fluage permanent.*

Ce comportement peut se représenter par l'équation:

$$l = l_0(1 + \beta t^{\frac{1}{3}})e^{\kappa t}$$

ou l_0, β, κ sont des constantes: le terme exponentiel représente un fluage à vitesse constante par unité de longueur, et il est dû au fait que la longueur qui s'écoule s'accroît pendant l'expérience: ainsi, si $\beta = 0$

$$\frac{1}{l}\frac{dl}{dt} = \kappa$$

L'importance de cette analyse tient à ce qu'elle divise le fluage en deux parties: l'une proportionnelle à $t^{\frac{1}{3}}$, dont la vitesse diminue donc très vite, l'autre proportionnelle à t, c'est-à-dire, se poursuivant à vitesse constante. La partie mesurée par β s'appelle fluage β, ou fluage transitoire; celle mesurée par κ est le fluage quasi-visqueux, ou permanent. A basse température, $\kappa = 0$.

On admet généralement que le fluage transitoire est lié à des glissements internes dans les grains, et le fluage permanent au mouvement relatif des grains [15]. Ainsi, Hanson et Wheeler, travaillant sur l'aluminium ont trouvé qu'à basse température, avec une déformation rapide (favorable au fluage transitoire) des lignes de glissement bien définies arrêtées sur les frontières cristallines, apparaissent à l'intérieur des grains, comme l'illustre la figure 17. A température élevée, avec une déformation lente, (favorable à l'écoulement permanent), les frontières des grains cristallins prennent de plus en plus d'importance, et même peuvent se produire des fissures entre les grains. Ceci est bien connu d'après certaines photographies, également de l'aluminium, dues à Wood et Rachinger [16]. La figure 15*a* dépeint la situation après un allongement rapide de 9% à 200°, que l'on peut considérer comme une température basse pour l'aluminium; on voit bien les lignes de glissement sur les grains. Sur la figure 15*b*, il y a eu un allongement rapide de 8% à 500°, ce qui est une température élevée: les

zones frontières sont larges et sombres, mais il y a quelques lignes de glissement. On avait montré auparavant [14] que le fluage transitoire était lié à une rotation des axes dans les grains, en accord avec le glissement sur les plans réticulaires. Apparemment, la loi en $t^{\frac{1}{3}}$ est très générale, mais il n'en existe pas encore de démonstration théorique complètement satisfaisante. Nous avons étudié récemment le fluage des métaux sous cisaillement pur, et dans ces conditions la loi en $t^{\frac{1}{3}}$ s'est trouvée complètement confirmée. Le fluage permanent ne se produit pas sous ce système de tensions particulières, ce qui s'accorde bien avec l'origine intergranulaire supposée.

Dans bien des cas, le fluage des métaux se complique par suite de recristallisation, surtout avec les aciers travaillant à haute température. Cela se produit aussi lors de l'écoulement du plomb très pur. Au cours de la recristallisation, certains petits grains réguliers tendent à étendre leur domaine aux dépens des autres, avec déplacement corrélatif des frontières. La figure 19 est une photographie frappante, prise au cours d'un travail effectué sous pur cisaillement. Les frontières cristallines indiquées si simplement sont les frontières originelles, mises en évidence par un révélateur, mais il y a eu une recristallisation intensive, comme le montrent les lignes de glissement, qui vont parfois d'un bout à l'autre de la figure. Cela signifie qu'un seul domaine cristallin recouvre la presque totalité de la plaque, les frontières apparentes ne représentent plus que l'ancien découpage de la surface: vieux fossés peu profonds, traversés par la charrue, maintenant que les petits champs d'autrefois ont été réunis en une seule ferme. Au cours de la recristallisation, le fluage est favorisé: on explique maintenant de façon satisfaisante les caractéristiques principales du fluage dans ces conditions. Il va sans dire, que ce bref compte-rendu ne fait même pas mention de bien des branches importantes du sujet. L'étude des propriétés mécaniques fondamentales des métaux est passée au premier plan depuis une vingtaine d'années, et, maintenant, on la poursuit activement aux Universités de Cambridge, Bristol, Birmingham et Londres, aussi bien que dans de nombreux laboratoires privés ou nationaux. En 1934, date de la Conférence Internationale sur l'Etat Solide de la Matière (Londres), il y avait à peine un livre consacré aux aspects physiques de la résistance métallique. En 1935, parut «*Kristallplastizität*», de Schmid et Boas; depuis ont paru en Angleterre, en Allemagne, en France, aux Etats-Unis, un certain nombre de livres importants sur ce que l'on appelle souvent physique des métaux: ce terme pourtant, devrait inclure les propriétés thermiques, optiques et électriques aussi bien que mécaniques. Après un long oubli, on commence à comprendre l'intérêt et l'importance de la recherche d'une explication des propriétés les plus évidentes de l'état métallique, dont beaucoup furent connues par des générations d'artisans. C'est le noyau atomique, bien sûr, qui reste le but suprême, mais la façon dont les atomes se tiennent ensemble, et modifient leur assemblage sous les traitements brutaux auxquels on les soumet est un sujet d'études qui ne manque pas d'attrait.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FINCH, G. I. *Trans. Faraday Soc.*, **33**, 425, 1937.

[2] HAUSSER, K. et SCHOLZ, P. *Wiss. Veröff. Siemens-Konzern*, **5**, 144, 1927.

[3] CHALMERS, B., KING, R., et SHUTTLEWORTH, R. *Proc. Roy. Soc.*, A, **193**, 465, 1948.

[4] ANDRADE, E. N. da C., et RANDALL, R. F. Y. *Proc. Phys. Soc. Lond.*, B, **63**, 210, 1950.

[5] AUST, K. T., et CHALMERS, B. *Proc. Roy. Soc.*, A, **201**, 210, 1950.

[6] OROWAN, E. *Rep. Phys. Soc. Prog. Phys.*, **12**, 185, 1949.

[7] HEIDENREICH, R. D., et SHOCKLEY, W. *Phys. Soc. Report on Strength of Solids*, 57, 1948.

[8] ANDRADE, E. N. da C. *J. Inst. Met.*, **60**, 427, 1937.

[9] BILBY, B. A. *Ibid.*, **76**, 613, 1950.

[10] BRAGG, L., et NYE, J. F. *Proc. Roy. Soc.*, A, **190**, 474, 1947.

[11] MOTT, N. F., et NABARRO, F. R. N. *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **52**, 86, 1940.

MOTT, N. F. *Physica*, **15**, 119, 1949.

[12] ANDRADE, E. N. da C., et RANDALL, R. F. Y. *Nature*, **164**, 127, 1949.

HARPER, S., et COTTRELL, A. H. *Proc. Phys. Soc. Lond.*, B, **63**, 331, 1950.

MENTER, J. W., et HALL, E. O. *Nature*, **165**, 611, 1950.

[13] ANDRADE, E. N. da C., et TSIEN, L. C. *Proc. Roy. Soc.*, A, **159**, 364, 1937.

[14] ANDRADE, E. N. da C. *Ibid.*, **84**, 1, 1910; **90**, 329, 1914; (avec B. CHALMERS) **138**, 348, 1932. *Phys. Soc. Rep. on Strength of Solids*, 20, 1948. *Nature*, **162**, 410, 1948.

[15] OROWAN, E. J. *West Scot. Iron Steel Inst.*, **54**, 45–96, 1946–7.

[16] WOOD, W. A., et RACHINGER, W. A. *J. Inst. Met.* **76**, 237, 1949.

L'érosion du sol

SIR CYRIL FOX

L'auteur illustre l'action érosive des eaux limoneuses par l'exemple de l'excavation du Grand Cañon dans l'Arizona, et celle des courants clairs et rapides par la régression des chutes du Niagara. Il donne des exemples remarquables d'érosion côtière par le reflux des vagues de tempête et des courants de marée aux Indes et en Angleterre. Il examine les glissements de terrains et de grands dépôts de boue à la suite de pluies abondantes, ainsi que le déplacement et la redistribution de terrain à la suite des éruptions volcaniques. Il étudie et il illustre l'érosion de vastes étendues de terre sous l'action combinée des pluies et des rivières. Il conclut en calculant approximativement le temps nécessaire pour que toute la terre du globe soit ramenée au niveau de la mer par l'érosion.

INTRODUCTION

Voilà 120 ans que les géologues se servent du mot érosion pour indiquer les processus naturels qui usent et qui rongent la substance de l'écorce terrestre. Le terme s'applique à une grande diversité d'actions physiques et chimiques; déplacement de matières solubles, transformations chimiques, désintégration par le gel ou par des changements brusques de la température, usure par des vents de poussière, affouillement par des courants limoneux, alternance de choc et de succion par des vagues de tempête, éboulements, etc. Au cours des quarante dernières années on s'est demandé si le terme érosion ne devrait pas s'appliquer à des agents dont l'action est relativement plus rapide, comme les explosions volcaniques et l'extraction des minerais par l'homme. Tous ces aspects d'une étude des plus importantes de l'écorce terrestre sont d'un intérêt fondamental pour le géologue.

DÉPLACEMENT DE MATIÈRES SOLUBLES

En 1927, l'étude d'un effondrement à Khewra, dans la Chaîne Salée du Pendjab amena l'examen d'une source qui avait apparu dans les mines de sel adjacentes. La source avait un débit de $2{,}1 \cdot 10^4$ cm³/sec et charriait 260 kg de sel par m³, ce qui représente plus de 200 000 tonnes de sel gemme par an (le double de la production des mines); la cavité résultante avait plus de $5{,}7 \cdot 10^4$ m³, soit environ les dimensions du trou dans lequel le village s'était effondré. Il est plus que probable que l'effondrement avait détourné le cours d'eau souterrain dans la mine; ce cas présente d'ailleurs un intérêt particulier du fait qu'il est lié d'une part aux sources d'eau salée et de l'autre à l'extraction de l'eau salée dans les gisements de sel gemme. Le calcaire se dissout d'une façon similaire, quoique plus lente, puisque les solubilités du sel et du carbonate de calcium sont dans le rapport de 360 à 0,014 environ. La grotte de Siju, dans l'Assam, est le déversoir d'une rivière souterraine qui se jette dans la rivière Simsang. Elle a plus de 1600 m de profondeur dans du calcaire à nummulites, et sa section moyenne est de 37 m². Elle est alimentée par un «entonnoir» dans lequel se jette un cours d'eau qui charrie des galets et du gravier provenant des collines gneissiques de la Chaîne de Tura, et dont le cours devient torrentiel pendant les pluies. En calculant l'âge de la grotte de Siju de la façon normale on arriverait environ à 25 000 ans, mais il faut tenir compte de la grande masse d'eau qui dissout la roche et de l'usure considérable due au frottement des blocs de gneiss et du gravier: en calculant l'âge de la caverne à moins de 5000 ans on est sans doute plus près de la réalité.

GORGES ET CAÑONS

Il est souvent difficile d'expliquer pourquoi une rivière a creusé un couloir, alors que d'après la topographie des lieux elle aurait pu faire un léger détour. La vitesse d'érosion dépend de la nature et de la structure des roches ainsi que des soulèvements ou des affaissements régionaux en cours qui font croître ou décroître la pente de la rivière. L'exemple le plus important et le plus spectaculaire de ce phénomène est celui du Grand Cañon du fleuve Colorado, dans l'Arizona. On évalue ses dimensions à 480 km de longueur, 1 km de profondeur et 16 km de largeur, ce qui permet de calculer le volume de roche érodée par le fleuve. Les strates, qui se composent en majeure partie de grès paléozoïque assez tendre, de schistes et de calcaires, s'inclinent en pente douce vers le sud-ouest; celles du fond (sol et côtés) comportent quelques roches précambriennes (algonkiennes) et archéennes (gneiss).

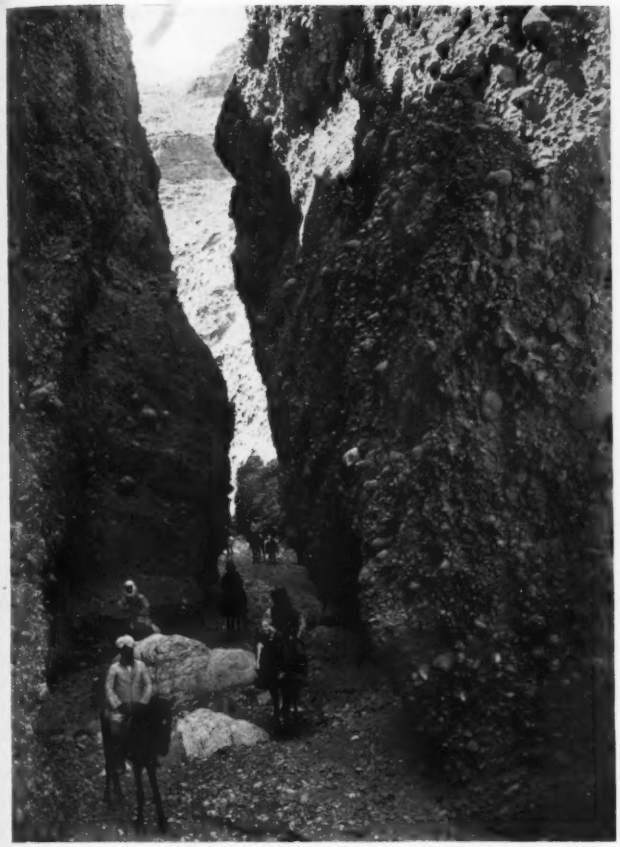


FIGURE 1 – *Un défilé du Béloutchistan près de Mach. On voit le cañon creusé par les eaux du fond à l'aide du gros bloc qui a servi de foreuse. (Photographie de Cyril S. Fox.)*

FIGURE 2 – *Gorge typique en forme de V, produite par l'érosion le long d'une pente. L'eau a entraîné un cône d'éboulis. (Photographie de J. B. Auden.)*

FIGURE 3 – *Erosion fluviale; effet sur du grès à joints du frottement produit par un petit torrent provenant d'un barrage. L'eau a récuré toute la terre qui se trouvait dans les fissures. (Photographie de W. D. West.)*

FIGURE 4 – *Une rivière de l'Himalaya, le Sutlej at Chabar, au nord de Simla: la rivière est en train de fouiller à nouveau deux anciennes terrasses riveraines. (Photographie de W. D. West.)*

FIGURE 5 – *La crevasse de Chappar, sous la Gorge de Boue, sur la voie ferrée de Quetta. Le petit cours d'eau issu de la crevasse a taillé une gorge typique en forme de V dans du calcaire éocène (Dunghan). (Photographie de Cyril S. Fox.)*

Le soulèvement des Montagnes Rocheuses a maintenu l'inclinaison du Colorado vers le sud-ouest, mais il est clair cependant que le Grand Cañon a été creusé principalement par les eaux limoneuses du fleuve. On évalue à 0,04 km³ la quantité annuelle de limon déversée par le Colorado dans le lac Mead. Si ce chiffre peut être pris comme moyenne pour le passé aussi, la gorge doit avoir près de 200 000 ans d'existence. Tout au contraire du Colorado, le Niagara, en sortant du lac Erié, est tout clair et transparent tandis qu'il se précipite vers les chutes américaines et canadiennes. L'action combinée de sa chute de 50 m dans les eaux tourbillonnantes du fond et des blocs de pierre qui y sont tombés provoque une usure considérable des schistes de Médine; il résulte de là que les strates surjacentes sont minées et que les chutes subissent une régression. Les strates paléozoïques sont en pente douce vers le sud-ouest, et la gorge sous les chutes a maintenant près de 11 km de longueur. On calcule que la gorge, par rapport au lac Ontario, progresse d'environ 60 cm par an: les chutes auraient donc à peu près 20 000 ans.

ÉROSION CÔTIÈRE

Beaucoup de cyclones du Golfe de Bengale, en se déplaçant vers le delta du Gange un peu en avance d'une marée haute, ont provoqué des raz de marée de 12 mètres de hauteur dans les estuaires et sur les terres basses. Le cyclone de 1864 fit s'échouer à sec au cap Shalimar près de Calcutta, un navire de 2200 tonnes. Par contre, c'est le «reflux», c'est-à-dire l'eau lorsqu'elle se retire, qui détruisit les récoltes et entraîna avec elle des milliers de gens et de têtes de bétail. On sait depuis longtemps que l'érosion dont souffre la côte du Yorkshire, en Angleterre, près de Hilderthorpe dans la baie de Bridlington est due aux courants de marée et aux vagues de tempêtes, mais il semble que ce soit l'absence de roches assez dures qui lui donne cette ampleur. L'argile à blocaux de la période glaciaire qui y est exposée contient trop peu de pierres roulées pour jouer le rôle de plage protectrice, comme c'est le cas pour la célèbre plage du Chesil Bank sur la côte du Dorset. Cette dernière, une plage naturelle de galets, s'étend sur 29 km de longueur depuis les abords de Bridport le long de la côte jusqu'à Abbotsbury et de là à Portland Island; les cailloux de quartzite qui ont été amenés de Budleigh Salterton, à 40 km de distance, par le frottement des marées et des vagues, en passant sous Lyme Bay jusque près de West Bay et de là le long du Chesil Bank, disparaissent dans la mer à Portland Island. A Budleigh Salterton les cailloux tombent de la falaise sur la plage, qui remplit ainsi un rôle de tablier protecteur pour les falaises. Les gisements de cailloux (triassiques) dérivent d'un grès paléozoïque (silurien inférieur); les cailloux primitifs furent donc produits il y a plus de 150 millions d'années à partir de matériaux érodés de roches plus anciennes il y a 400 millions d'années, et ces mêmes cailloux sont utilisés à nouveau.

ÉBOULEMENTS ET GLISSEMENTS DE BOUE

Dans certaines régions arides où une large vallée est comblée par un gîte alluvionnaire de boue et de gravier, il arrive qu'une brusque chute de grosse pluie transforme cette matière en un liquide qui se meut comme un courant de lave et qui peut franchir une grande distance. La Gorge de Boue, dans le Béloutchistan, est célèbre pour ses schistes pyritifères (de l'éocène) qui, lors des pluies, acquièrent la consistance de la boue liquide. Il y a des cas extrêmes où le sol et le sous-sol des collines s'imprègnent d'eau; ils perdent ainsi la cohésion qui permettait à cette masse de demeurer à un angle naturel de repos fort élevé. Dans le cas de l'éboulement de Gohna, à Garhwal (Himalaya), la colline se composait de calcaire dolomitique ridé, de schistes pyritifères, etc., et s'inclinait à un angle de 45° vers la vallée de Birahi Ganga. Après une période de grosses pluies il se forma un plan le long duquel la masse surjacente glissa de 900 m et remonta même quelque peu le long de la colline opposée. Une masse de 5 milliards de tonnes (2 km³) de débris rocheux remplit la vallée sur une largeur de 3,2 km et à une hauteur de 260 m (jusqu'au col); une poussière neigeuse se déposa sur tout à des kilomètres à la ronde. Le lac mit tout un an à se remplir, mais lorsqu'il déborda au col, $3{,}4 \cdot 10^8$ m³ d'eau furent déchargés, et la hauteur du «barrage» fut très rapidement réduite de 122 m. Le torrent se précipita dans la vallée à 32 km/h, et sa profondeur était de 30 à 50 m très loin en aval. Le plus grand éboulement connu est peut-être celui qu'on appelle le Saidmarreh de Louristan, en Perse, et qui se produisit à l'époque préhistorique. La cassure se voit sur 14,5 km de longueur, ce qui indique une masse de 450 m de haut sur 4 km de large. Les débris comblèrent le confluent des rivières Saidmarreh et Kashgan jusqu'à une hauteur de 300 m. La gorge creusée par les eaux de chute a encore 120 m de profondeur et l'on retrouve des débris sur une surface de 166 km².

EXPLOSIONS VOLCANIQUES

Les villes romaines de Pompéi, de Stabies et d'Herculanum furent si complètement ensevelies sous les cendres volcaniques de l'éruption violente du Vésuve en l'an 79, que le lieu de leurs emplacements fut perdu pour des siècles. Plus récemment, l'explosion de 1883, qui anéantit totalement l'île de Krakatoa, fut beaucoup plus violente. L'île devait avoir 8 km de long sur 5 km de large et s'élevait à 760 m au-dessus de la mer, mais après l'explosion la cavité se trouvait à 300 m au-dessous de la mer. On estime à 20 km^3 le volume de lave, de pierre ponce et de poussière rejetées. La poussière volcanique s'éleva à 27 km de hauteur et des vagues de 24 à 30 m de hauteur assaillirent à coups répétés la côte voisine; la poussière fit l'obscurité dans un rayon de 40 km, et quinze jours après on voyait flotter à Lampong Bay, à 80 km de distance, une couche de pierre ponce de 4 m d'épaisseur. En 1912 une autre explosion eut lieu en Alaska: le Mont Katmai explosa, formant un cratère de 5 km de diamètre et de 1 km de profondeur, tandis que l'île Kodiak, située à 160 km de là, était recouverte d'une couche de poussière de plus de 30 cm d'épaisseur.

ÉROSION PAR LES RIVIÈRES

En général, la pluie et les rivières œuvrent lentement et progressivement, mais il faut des pluies abondantes et des inondations pour que le rocher désagrégé et les matières détritiques soient entraînés. Dans la figure 1 on voit une gorge du Béloutchistan, près de Mach: elle a été découpée très rapidement par les inondations terribles qui succèdent à toute grosse pluie dans cette région aride. Le «secret» du gouffre est le gros bloc erratique qu'on voit au fond. Le tourbillon qui se produit à cet endroit le soulève et le fait tournoyer à la manière d'une machine à forer qui creuse dans le lit de la rivière et approfondit la gorge à chaque période de crues. Un cas semblable d'érosion de lit de rivière fut découvert au Black Canyon, lors de la construction du barrage Hoover. En-dessous d'une couche de 12 m de sable on trouva une poutre sciée reposant sur le fond rocheux, où se révéla une gorge souterraine de 21 m. L'état d'usure des parois rocheuses de la gorge intérieure, comme la présence de la poutre, prouve que la masse entière de sable qui couvre le sol du Black Canyon est agitée de façon turbulente dans la gorge à chaque crue du Colorado. Des dépôts limoneux sont emprisonnés dans chacun des réservoirs situés au-dessus des divers barrages qu'on a construits, et l'on constate — au lac Mead au-dessus du barrage Hoover, au lac Havashu au-dessus du barrage Parker, etc. — que la rivière fouille à nouveau la vase qui s'était déposée dans son lit auparavant. L'érosion a lieu au bas des barrages, puisque la rivière ne remplace plus les dépôts que le courant a entraînés en aval.

La matière enlevée par l'érosion dans une vaste zone de drainage, celle du Mississippi, avec sa région humide à l'est et ses plaines arides à l'ouest, s'élève annuellement à 31,5 tonnes de substances dissoutes, 113 tonnes de matière en suspension et 13 tonnes de fond par kilomètre carré; cette matière est déversée dans le golfe du Mexique. Dans le cas du Nil, qui reçoit ses eaux chargées de limon au cours des pluies dans les montagnes d'Abyssinie, la quantité annuelle de matière recueillie à Assouan, de la moitié de la zone de captation qui a une surface totale de $4 \cdot 10^6$ km^2, s'élève à $58 \cdot 10^6$ tonnes de limon fin et $20 \cdot 10^6$ tonnes de matière soluble. De Khartoum à Assouan le lit du Nil est soumis à l'érosion, et entre Assouan et le Caire l'ancien dépôt alluvionnaire est affouillé à nouveau. On attribue cette renaissance de l'érosion du lit du fleuve au fait que sa pente devient plus rapide; l'augmentation de la pente serait due d'une part au poids de l'apport alluvionnaire dans le delta, et d'autre part à l'allègement (par l'érosion) dans la région au sud et au sud-est d'Assouan.

Si l'on suppose que 118 tonnes de matière par km^2 sont enlevées annuellement de la surface continentale ($149 \cdot 10^6$ km^2), — en comptant 83 tonnes de matière en suspension, 23 tonnes de matière dissoute et 12 tonnes de fond — l'érosion annuelle s'élèvera à 9,05 km^3. Comme l'élévation moyenne de la terre au-dessus du niveau de la mer est évaluée à 0,8 km, son volume est de $119 \cdot 10^6$ km^3. Avec une érosion de 9,05 km^3 par an, toute la croûte terrestre serait nivelée en moins de $14 \cdot 10^6$ ans. Comme il y a des parties considérables de la surface de la terre qui ne subissent pas d'érosion appréciable: les deltas, les déserts, les lacs et les zones intérieures de drainage, ainsi que les régions polaires recouvertes de nappes épaisses de glace, il est évident que la vitesse d'érosion calculée est exagérée; néanmoins, si même on n'accepte que le quart de ce chiffre de 9,05 km^3, les régions continentales seraient théoriquement ramenées au niveau de la mer par l'érosion en $60 \cdot 10^6$ ans (depuis le début de l'ère tertiaire).

Ecologie des infusoires ciliés

E. FAURÉ-FREMIET

Le développement des infusoires ciliés, largement répandus dans tous les habitats aquatiques, dépend en grande partie des ressources alimentaires à leur disposition. L'auteur étudie le mécanisme ingénieux et perfectionné grâce auquel ils capturent et absorbent leur nourriture ainsi que leur comportement ultérieur. Il s'attache en particulier au phénomène de la microbiocénose, cette association que forment les infusoires avec toute une série de minuscules organismes végétaux et animaux et avec lesquels ils remplissent un rôle nutritif réciproque.

Parmi les Protozoaires, les Infusoires Ciliés se caractérisent par un très haut degré de différenciation et de complexité morphologique. Ehrenberg les décrivit, voici près de 120 ans, comme des organismes au sens le plus complet du mot; le grand micrographe se trompait seulement lorsque, comparant l'organisation de ces êtres à celle de petits Métazoaires tels que des Rotateurs, il croyait pouvoir superposer à des analogies fonctionnelles de véritables homologies structurales. Il fallut, tout d'abord, la sagacité de F. Dujardin pour reconnaître que les Ciliés sont formés, comme des Rhizopodes, par une matière visqueuse, et qu'ils répondent de ce fait à un type nouveau d'organisation; il fallut ensuite l'esprit généralisateur de V. Siebold, pour identifier le *sarcode* de Dujardin au *protoplasma* de H. Mohl, et pour considérer les Protozoaires comme des êtres unicellulaires; il fallut enfin les judicieuses remarques de C. C. Dobell, pour reconnaître que les Protozoaires se définissent, plus exactement sans doute, comme des organismes non-cellulaires.

La diversification des Ciliés permet leur adaptation à des milieux très variés; mais, si l'on distingue aisément les formes planktoniques et les formes littorales, les espèces mobiles et les espèces sédentaires, celles dont l'alimentation, généralement phagotrophe, est plus particulièrement microphage, ou macrophage, ou histiophage, etc, il reste beaucoup à apprendre en ce qui concerne l'écologie de ces organismes. A cet égard, la petite dimension et le taux de multiplication élevé des Ciliés, permet à leurs populations et à leurs associations d'évoluer à la fois dans un espace restreint et dans un temps court; cette condition est très favorable à l'étude des interrelations et des interdépendances qui s'établissent non seulement entre les différentes espèces d'Infusoires, mais encore entre celles-ci et les autres organismes animaux ou végétaux de petite taille, dont l'ensemble constitue ce que l'on peut nommer des microbiocénoses.

Les Ciliés sont très largement répandus dans tous les milieux aquatiques; parmi beaucoup d'autres recherches, celles de L. Noland, de Wang, de Picken, montrent que, à l'égard de diverses conditions physico-chimiques telles que: éclairement, température, *p*H, salinité, teneur de l'eau en O_2 et en CO_2, leur marge de tolérance est généralement assez élevée. Il apparaît alors que les conditions d'alimentation représentent le facteur principal de leurs rassemblements et de leurs localisations éventuelles dans certains biotopes limités. Malheureusement, nos informations restent trop souvent incertaines concernant la physiologie alimentaire des Ciliés, dont un simple exemple va montrer la signification écologique.

Les Ophryoglénides sont des Ciliés holotriches que l'on rencontre fréquemment dans les eaux douces et marines, mais presque toujours à l'état d'exemplaires rares et dispersés, dont l'identification spécifique reste difficile d'après les descriptions données par les anciens auteurs. Les recherches poursuivies dans mon laboratoire par Hélène Mugard montrent que les Ophryoglénides sont caractérisées par un cycle physiologique particulier, à peine soupçonné jusque-là. Ces Infusoires se rencontrent parfois dans les eaux claires sous forme d'individus allongés, transparents, nageant à grande vitesse, et que l'on serait tenté de considérer comme essentiellement planktoniques; il s'agit, en fait, d'individus chasseurs, ou thérontes. Si l'un de ceux-ci, au hasard de sa course, approche d'un organisme blessé ou de quelque débris animal, un chimiotactisme, dû à des composés organiques diffusibles, l'attire vers les tissus lésés; sa forme change brusquement, puis il attaque ces tissus en un mouvement de vrille, s'insinue entre les cellules, et ingère gloutonnement leurs débris; l'Infusoire repu, épais, opaque, est devenu méconnaissable

et peut en imposer pour une autre espèce; il s'éloigne lentement du lieu de son repas, s'enkyste sur une surface immergée, digère ses ingesta et subit deux ou trois divisions successives qui donneront quatre ou huit individus nageurs semblables aux premiers, et bientôt en quête de nourriture. De tels Ciliés, que nous caractériserons comme histiophages, ont été longtemps méconnus parce qu'il fallait les étudier *in vitro*, au cours de leur cycle physiologique, pour caractériser les espèces, et saisir l'importance éventuelle de leur rôle dans l'économie des petits biomes aquatiques.

Les Ciliés microphages sont de beaucoup les plus fréquents et les plus riches en espèces variées; ils se nourrissent de fines particules organiques et de Bactéries en suspension, qu'un courant provoqué par des mouvements ciliaires, attire vers leur bouche.

Mais d'autres espèces sont macrophages; les unes, végétivores, absorbent des Diatomées, des Desmidiées, des Oscillaires etc.; les autres, carnivores, se nourrissent d'autres Infusoires et quelques-uns de ces prédateurs peuvent s'attaquer à des proies volumineuses, qu'ils immobilisent fréquemment par une décharge de trichocystes toxiques avant de les engloutir; les enregistrements microcinématographiques réalisés par J. Dragesco illustrent clairement la voracité de ces derniers.

Pour un très grand nombre de Ciliés microphages ou prédateurs l'aliment ne saurait être quelconque, et certaines proies dont la spécificité peut être très étroitement déterminée sont nécessaires à l'entretien d'une espèce donnée. Ce fait pourrait être lié à quelque particularité structurale intervenant dans la capture et l'ingestion mais, bien plus souvent, il doit être lié à des particularités biochimiques.

Les belles recherches poursuivies dans le laboratoire de A. Lwoff et dans celui de G. W. Kidder sur la nutrition de Ciliés entretenus en culture aseptique, montrent, en effet, que nombre d'entre eux n'ont qu'un pouvoir de synthèse restreint, de sorte que leur entretien nécessite l'apport de substances complémentaires, ou de facteurs de croissance, éventuellement élaborés soit par des Bactéries, soit par des Algues, soit par d'autres Ciliés. Il apparaît ainsi que les nécessités alimentaires peuvent créer des relations d'interdépendance nutritive plus ou moins étroitement spécifiques. De telles interrelations sont généralement à l'origine de toute microbiocénose.

Il existe dans les eaux douces, différents types d'associations dont les constituants principaux sont des Protozoaires et des Protophytes; un cas relativement simple est apporté par les associations à *Beggiatoa*.

Les *Leucothiobacteriales* se développent souvent en plaques blanches veloutées sur de la vase noire, riche en matières organiques, recouverte par une faible épaisseur d'eau courante; leur présence indique la préexistence dans la vase de Bactéries anaérobies capables de décomposer la matière organique en formant de l'hydrogène sulfuré que les *Beggiatoa* utilisent en l'oxydant. Les taches blanches apparaissent ainsi comme le résultat d'une association bactérienne; mais leur aspect dépend de propriétés particulières aux *Leucothiobacteriales*, dont les longs filaments se déplacent lentement à la surface de la vase, s'enchevêtrent entre eux et forment un feutrage dont le contour et l'épaisseur sont réglés par une double tendance à l'étalement sur le substrat, et à la condensation superficielle.

Le feutrage des *Beggiatoa* retient de l'eau qui se renouvelle lentement; l'addition de rouge de phénol montre à son niveau une teinte jaune, indiquant un *p*H légèrement plus acide (6,8 environ) que celui du milieu liquide environnant. Cette acidification, due au métabolisme des *Beggiatoa*, provoque le rassemblement chimiotactique de deux espèces banales de Ciliés microphages, *Colpidium campylum* et *C. colpoda*, qui s'amassent autour du feutrage, le pénètrent, et se nourrissent activement des petites espèces bactériennes qu'il renferme. Dès ce moment le phénomène écologique est doublement caractérisé par l'amorçage d'une chaîne de nourriture et par le début d'une microbiocénose.

La multiplication des deux espèces de *Colpidium* dans ce milieu favorable, y crée rapidement une forte densité de population; il faut remarquer que cette densité résulte non seulement d'une multiplication, mais encore de l'équilibre statistique entre les entrées et les sorties d'individus mobiles qui restent un temps plus ou moins long dans le feutrage bactérien où se trouve leur nourriture.

Les deux espèces de *Colpidium* ne semblent pas se gêner l'une l'autre; leur présence ne nuit pas aux *Beggiatoa*, bien au contraire, car les mouvements des Infusoires assurent le renouvellement de l'eau à l'intérieur du feutrage et maintiennent celui-ci en forme et en activité. Mais l'équilibre de l'association est bientôt modifié par de nouveaux arrivants appartenant à la catégorie des Infusoires prédateurs.

Ces Ciliés voraces ne sont ordinairement représentés que par des individus très dispersés; certains se nourrissent presque exclusivement de *Colpidium*

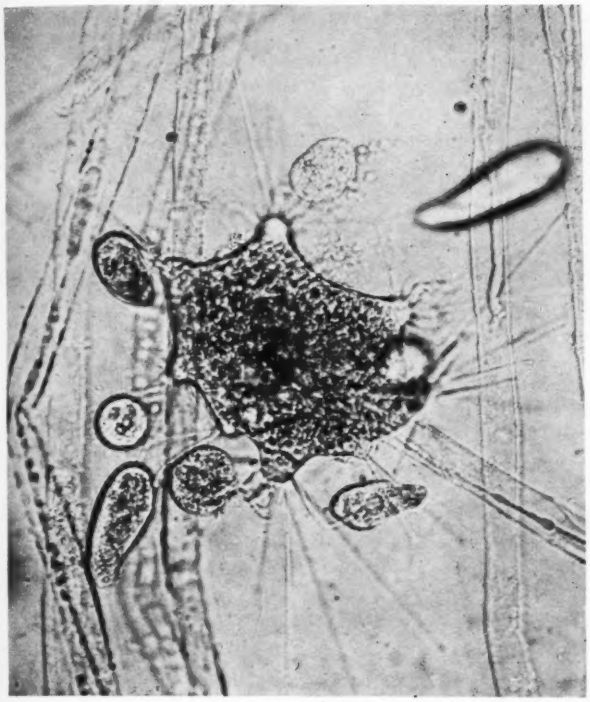


FIGURE 1 – Trichophrya epistylidis *sur des pédoncules de* Carchesium, *capturant et suçant des* Colpidium campylum.

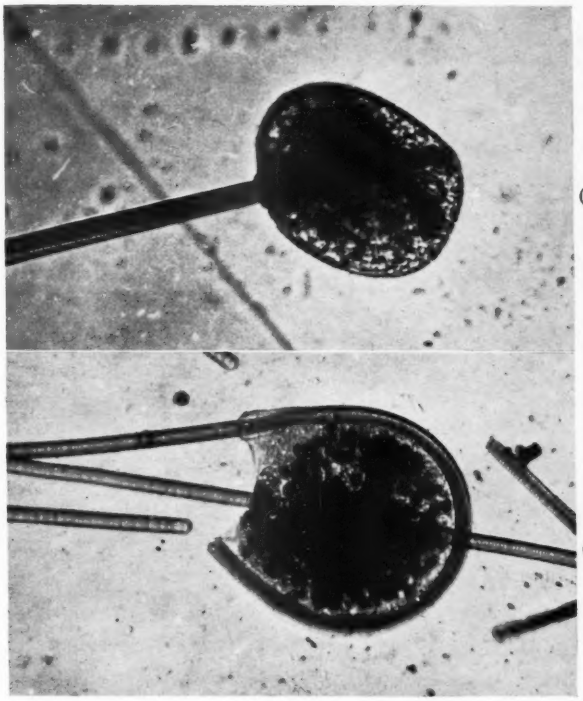


FIGURE 2 – Nassula ornata *ingérant une Oscillaire;* (a) *début de l'ingestion;* (b) *le corps de l'Infusoire est déformé par l'élasticité du trichome.*

FIGURE 3 – Coleps hirtus *observés en lumière oblique, après incinération pour montrer la carapace calcifiée.*

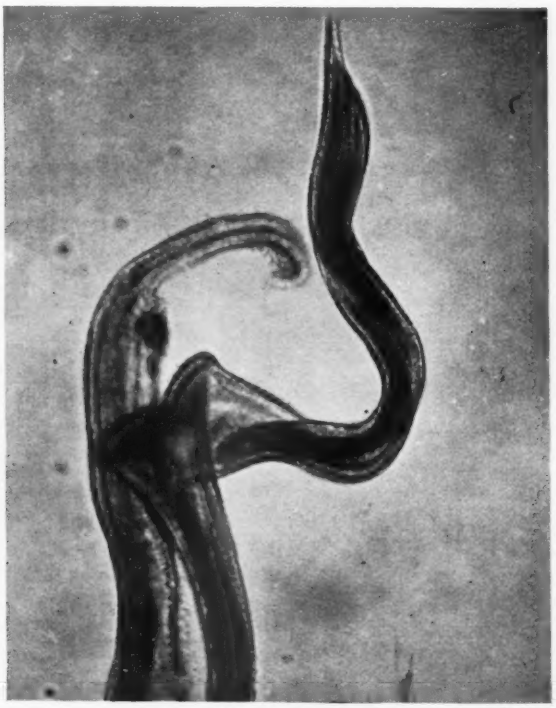


FIGURE 4 – Centrophorella fistulosa, *très grand Infusoire rubané, caractéristique des sables marins fins.*

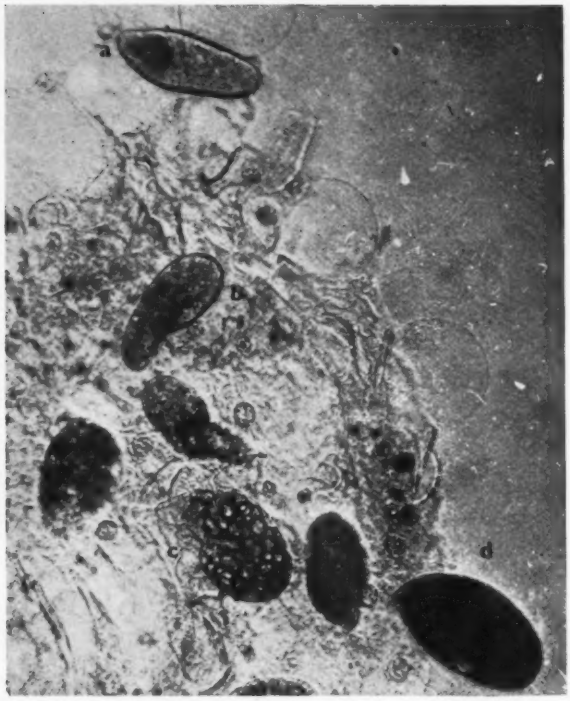


FIGURE 5 – *Une Ophryoglénide:* Deltopylum rhabdoides *s'attaquant au tissu intestinal d'une larve de Chironome.* (a) *individu chasseur arrivant au contact du tissu;* (b), (c), (d) *individus ingérant les éléments tissulaires.*

FIGURE 6 – Colpidium colpoda *et* C. campylum; *imprégnation argentique de la ciliature (technique de Chatton et Lwoff).*

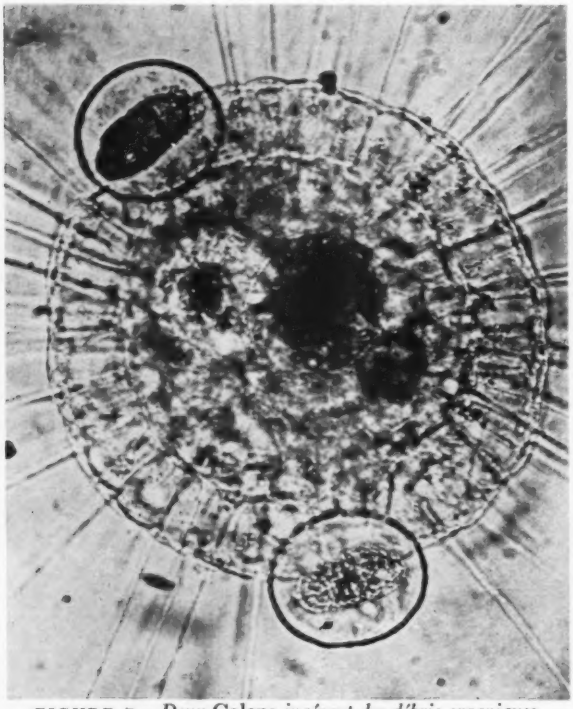


FIGURE 7 – *Deux* Coleps *ingérant des débris organiques.*

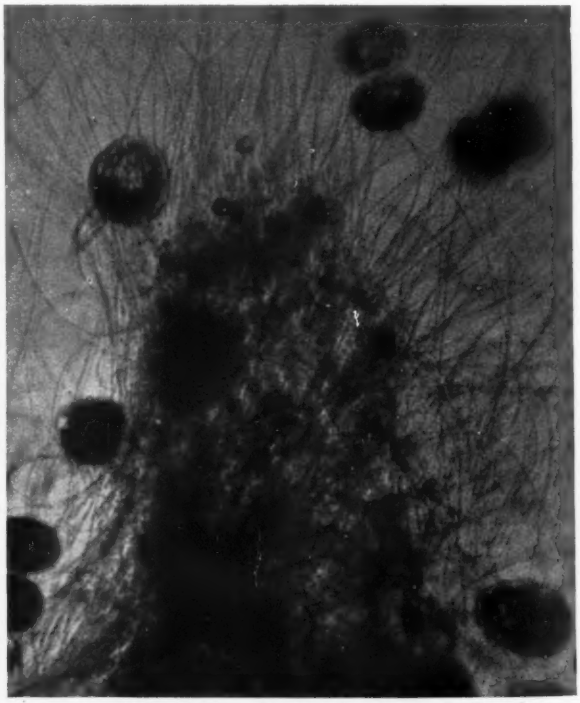


FIGURE 8 – Glaucoma *sp. broutant le feutrage des* Beggiatoa; *l'accumulation des grains de soufre très réfringents communique à l'Infusoire une teinte sombre.*

campylum: tels sont *Enchelys mutans*, *Lionotus lamella*, *Leucophrys patula*. Si l'un de ces Ciliés arrive au voisinage de l'association à *Beggiatoa*, il commence à se repaître de sa proie habituelle, et sa vitesse de multiplication est suffisante pour assurer la quasi destruction du *Colpidium campylum*.

Ces trois espèces de prédateurs sont apparemment équivalentes et interchangeables, si l'on considère seulement l'effet exercé par l'une ou l'autre sur l'équilibre de l'association initiale; mais si deux d'entre elles interviennent simultanément, il n'en est plus ainsi. Les expériences réalisées par J. Ducornet montrent, par exemple, que *Lionotus lamella* est capable d'attaquer *Leucophrys patula*, et que ce dernier peut de même engloutir de petits *Lionotus*; mais, dans ce cas, la proie ingérée dévore et tue son prédateur, de sorte que la compétition engagée est généralement fatale au *Leucophrys*.

La destruction du *Colpidium campylum* limite automatiquement, par manque de nourriture, la multiplication du *Lionotus*, et semble agir indirectement sur celle du *Colpidium colpoda* qui se ralentit. C'est alors que deux nouvelles espèces s'infiltrent dans la population infusorienne déjà clairsemée; l'une est un *Glaucoma* sp. qui se nourrit exclusivement de *Beggiatoa*, l'autre est *Chilodonella cucullulus* qui utilise principalement les mêmes Thiobactéries. Ces deux espèces s'attaquent ainsi au feutrage organique qui formait le support de l'association, et leur multiplication rapide provoque, avec sa destruction la fin de la biocénose, dont les restes sont ingérés par un Cilié détritivore, *Coleps hirtus*, dernier occupant qui se multiplie à son tour.

Cet exemple n'est pas isolé; L. Picken a étudié deux autres types de microbiocénoses, la «fungus association», dont le substrat organique est constitué par le réseau mycélien du *Sphaerotilus natans*, et la «blue-green association» dont le substrat est formé par des trichomes de Cyanophycées. La nourriture de base, constituée dans le premier cas par des Bactéries et dans le second par des Diatomées, est utilisée par diverses espèces de Protozoaires et plus spécialement de Ciliés qui amorcent ainsi des chaînes de nourritures différentes, continuées par les prédateurs carnassiers. Dès lors, «l'assemblage des Protozoaires . . . n'est pas une collection d'individus dépendant directement, pour la majeure partie, d'une source de nourriture déterminée, mais une communauté différenciée d'herbivores et de carnivores formant avec l'approvisionnement de base, une unité sociale fermée». Cette conclusion est également valable dans le cas des *Beggiatoa*.

Dans chacune de ces biocénoses, chaque espèce associée joue, comme le remarque Picken, un rôle défini, ou remplit, pourrait-on-dire, une fonction particulière, dont le caractère dépend de ses besoins alimentaires spécifiques, et dont l'importance relative est liée à sa capacité de multiplication. Pour chaque type de communauté, la distribution fonctionnelle des espèces réalise une «structure sociale» caractéristique; mais un même rôle peut être tenu par plusieurs espèces équivalentes et interchangeables, de sorte que la composition spécifique d'une association peut varier sans modifier la «structure sociale», non plus que la convergence des chaînes trophiques, suivant le mode pyramidal de Elton.

Mais parallèlement à leur structure sociale, les associations possèdent une structure physique dont les caractères propres dépendent de la nature du substrat organique: mycélium fungique, enchevêtrement de Cyanophycées, ou, comme dans le cas précédent, feutrage de *Beggiatoa*. Picken souligne le rôle important joué par cette structure réticulée, qui supporte les mouvements thigmotactiques si fréquents chez les Protistes, et qui immobilise dans ses mailles une masse liquide constituant, en quelque sorte, le milieu intérieur de la biocénose.

Les grands Infusoires sédentaires tels que les *Stentor*, comme les colonies rameuses des *Carchesium*, des *Epistylis* et des *Opercularia*, développées sur des surfaces immergées, peuvent constituer un substrat organique utilisable pour certaines associations; le puissant courant liquide provoqué par le mouvement ciliaire des zoïdes fait refluer vers la base un grand nombre de particules, de Bactéries, de Diatomées, qui recouvrent bientôt le sol et sont utilisés par divers Ciliés nageurs, microphages ou végétivores, constituant la population fluctuante; et celle-ci est exploitée par des Tentaculifères commensaux des Vorticellides coloniales, ou par divers prédateurs particuliers dont quelques-uns s'attaquent aux zoïdes coloniaux eux-mêmes.

BIBLIOGRAPHIE

FAURÉ-FREMIET, E. «Comm. Bassin de la Seine», 1945.
Ibid. J. Anim. Ecol., **17**, 127–30, 1948.
Ibid. Bull. Biol., 1950 (sous presse).
MUGARD, H. *Ann. Sci. Nat.* B, **10**, 171–268, 1949.
NOLAND, L. E. *Ecology*, **6**, 437–52, 1925.
PICKEN, L. E. R. *J. Ecol.*, **25**, 368–84, 1937.
WANG, CHAI CHI. *J. Morph.*, **46**, 431–78, 1928.

La technique de coloration en biologie

H. GRAHAM CANNON

Une ancienne méthode consistant à monter au Baume du Canada les petits organismes animaux et végétaux pour étudier leur anatomie microscopique nécessite un éclairage spécial si les indices du Baume et de l'échantillon sont peu différents. Cette difficulté explique la généralisation de l'emploi des méthodes de coloration dont on expose les principes généraux et le développement historique. L'auteur souligne la nécessité pour un colorant donné de fournir des résultats constants. Il décrit la découverte accidentelle et les propriétés de coloration sélective du Noir Chlorazol E et en donne des illustrations. Il examine les méthodes de double ou multiple coloration et montre l'usage des techniques de coloration dans l'étude de la physiologie cellulaire.

On montre au Musée de Sheffield (Angleterre) une collection de vues de projection d'animaux marins. Il ne s'agit pas, comme on pourrait s'y attendre, de dessins ou de photographies mais d'animaux eux-mêmes aplatis et montés dans une résine transparente appelée Baume du Canada. Ces préparations ont été réalisées par le Docteur W. C. Sorby au XIXe siècle. Certains échantillons de Sorby ont conservé en grande partie leur coloration naturelle; par exemple, un petit carrelet montre toute la gamme de sa pigmentation naturelle. Mais d'autres, comme *Aurélia*, méduse commune, ont été colorés. Les colorants employés par Sorby sont tout à fait amusants. Il employait le carmin, colorant utilisé communément à l'heure actuelle dans toutes les classes élémentaires. Mais il a aussi fait des expériences heureuses avec toutes sortes d'extraits comme le jus de prune de Damas et le jus d'airelle. C'est avec le vin de Porto qu'il a réalisé une de ses colorations les mieux réussies.

Les savants non biologistes peuvent raisonnablement se demander pourquoi Sorby avait pris la peine de colorer ses spécimens: on peut voir les animaux vivants et aussi, sans doute, voir ceux qui ont été conservés. Ceci n'est pas absolument vrai, car beaucoup d'animaux sont presque impossibles à voir à l'état vivant. En fait, le protoplasme vivant à l'état pur est incolore et transparent. On peut illustrer ce fait d'une manière frappante en collectant des êtres microscopiques flottants (plankton), par exemple dans le lac Windermere. L'été on recueillera presque toujours des *Leptodora*. Cette variété de puces d'eau est relativement énorme à côté des autres, ayant une longueur de 1,3 cm. Cependant elle n'est visible parmi les autres organismes flottants qu'en raison du fait qu'au cours de sa nage elle rejette toutes les autres puces d'eau plus petites en dehors de son trajet. Elle est transparente comme du verre avec seulement une tache pigmentée noire représentant l'œil. Pour observer sa forme et sa taille on peut la conserver ou «fixer». Si nous fixons un *Leptodora* vivant — sans préciser avec quel fixateur — le corps de transparent qu'il était devient blanc opaque. En fait, la fixation a simplement converti quelque chose de transparent dont nous ne pouvions pas aisément voir la forme externe en un objet si opaque que nous ne pouvons voir à travers et dont nous ne pouvons par conséquent étudier l'anatomie interne. On peut éviter cette opacité en remplaçant l'eau du spécimen par un alcool tel que l'alcool éthylique et ensuite une huile très réfringente telle que l'essence de girofle ou le xylol. Le spécimen retrouve alors sa transparence complète. En fait, les seules parties qui en sont visibles sont celles qui contiennent du pigment ou, plus exactement, celles qui ont retenu leur pigment au cours de ce traitement brutal destiné à éliminer l'eau. En effet, pendant la fixation puis le traitement beaucoup de substances à l'intérieur des cellules sont soit démolies soit dissoutes.

Les spécimens non colorés, montés comme je l'ai décrit, se conservent indéfiniment. On peut les placer dans du Baume du Canada et nous n'avons aucune raison de supposer qu'il puisse se produire une altération quelconque, ce qui constitue un argument de poids en leur faveur. Aussi est il possible quoique difficile de les utiliser, sans autre traitement, pour l'étude anatomique. Il n'y a qu'une très faible probabilité pour que l'indice de réfraction des substances du spécimen soit exactement le même que celui du milieu de montage; dans ce cas le spécimen deviendrait invisible mais ordinairement il existe une faible différence d'indice de réfraction et une différence même très faible suffit pour obtenir une image, en

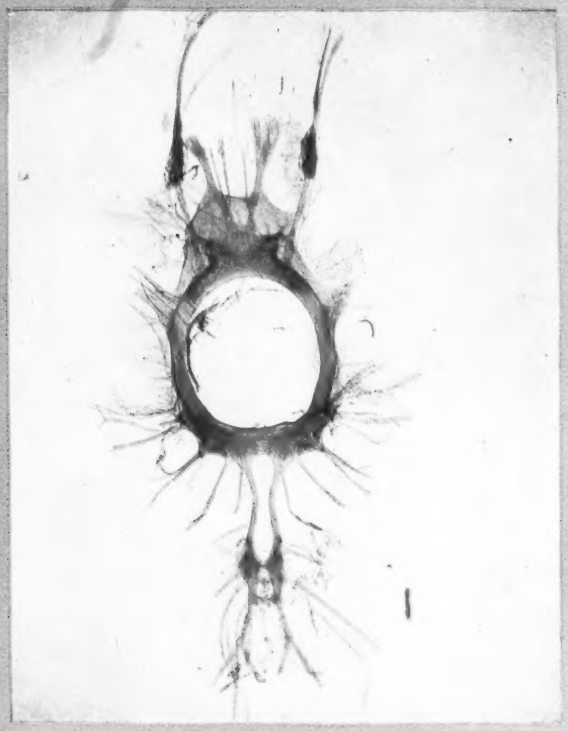


FIGURE 1 – *Coloration générale. Système nerveux d'un Ostracode disséqué et coloré par le Carmin au Borax.*

FIGURE 2 – *Triple coloration. Coupe de rétine de mammifère, coloration classique de Mallory. Tissu conjonctif et cartilage en bleu, globules sanguins et noyaux des cellules rétiniennes pourpres.*

FIGURE 3 – *Triple coloration. Coupe de peau humaine suivant la technique de Van Gieson modifiée. La couche externe,* stratum corneum *se divise chimiquement en deux couches: l'externe colorée par l'acide picrique, l'interne par la fuchsine. Vers l'intérieur la* stratum lucidum *est colorée par l'acide picrique et la* stratum granulosum *par l'hémalum.*

FIGURE 4 – *Coupe de peau de souris injectée de Noir Chlorazol. Les histiocytes ont pris le colorant et apparaissent en noir sur le reste de la coupe où les noyaux sont colorés en rouge et le cytoplasme en orangé.* (*Aimablement communiquée par le Dr J. R. Baker, Oxford.*)

FIGURE 5 – *Imprégnation à l'argent traitée ensuite par l'or. Coupe de cervelet de Mammifère.*

FIGURE 6 – *Imprégnation au chlorure d'or des terminaisons nerveuses dans un muscle squelettique.*

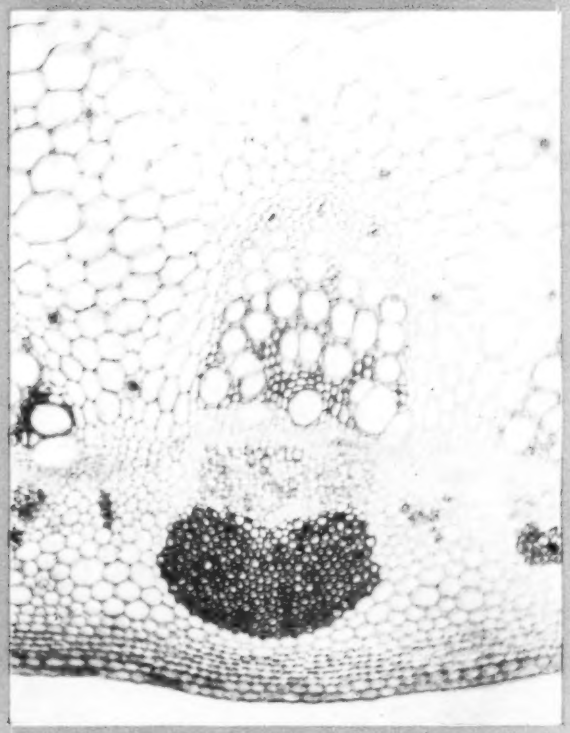


FIGURE 7 – *Double coloration. Coupe transversale de tige d'*Hélianthus. *Les cellules lignifiées sont colorées en rose par le Rose Lignine et le reste des tissus en noir par le Noir Chlorazol.*

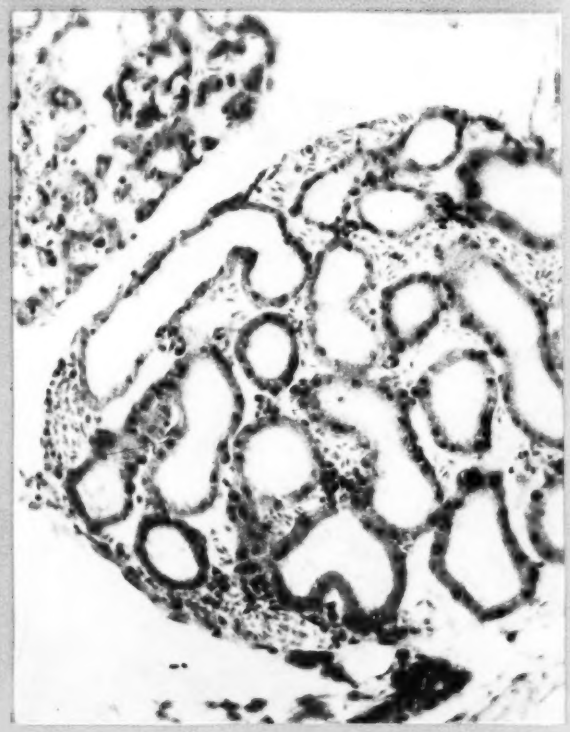


FIGURE 8 – *Double coloration. Coupe de rein de têtard de grenouille montrant les globules rouges du sang colorés en vert par le Vert Victoria et le reste des tissus en pourpre par le Pourpre Hickson.*

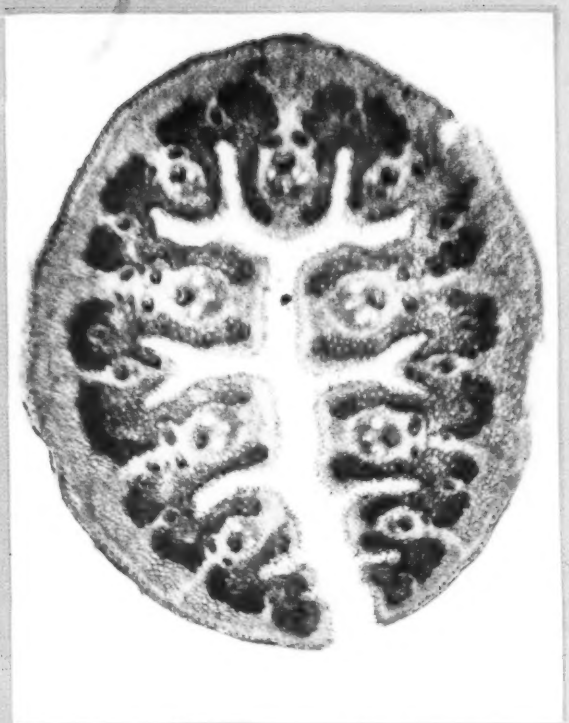


FIGURE 9 – *Coloration simple produisant un effet multiple. Coupe transversale d'alfa colorée par l'Azurine Chlorazol.*

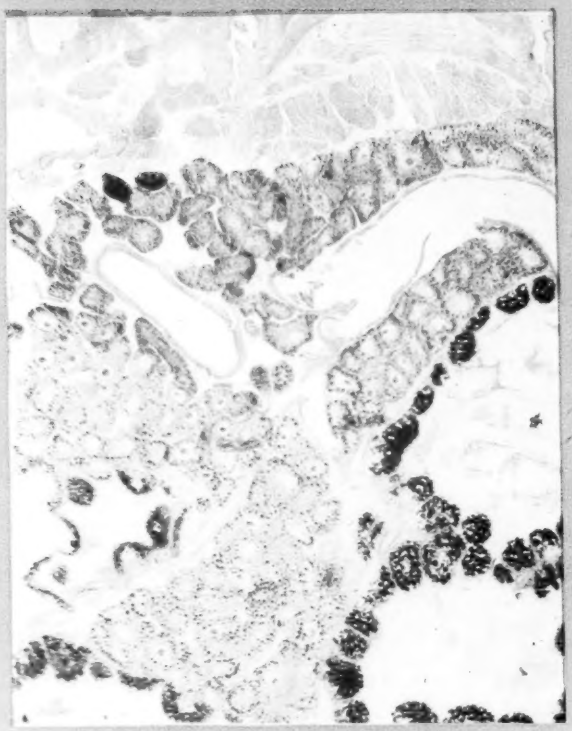


FIGURE 10 – *Effet de coloration produit par fixation. Gouttelettes de graisse colorées en noir par fixation à l'acide osmique. Reste de la coupe vert pâle et rouge.*

(Aimablement communiquée par le Professeur R. Dennell.)

FIGURE 11 – *Coloration générale.* Pénicillium *coloré au Noir Chlorazol.* *(Aimablement communiquée par Mr F. D. Armitage.)*

FIGURE 12 – *Triple coloration. Coupe épaisse d'un anatife colorée au Mallory après fixation à l'alcool.*

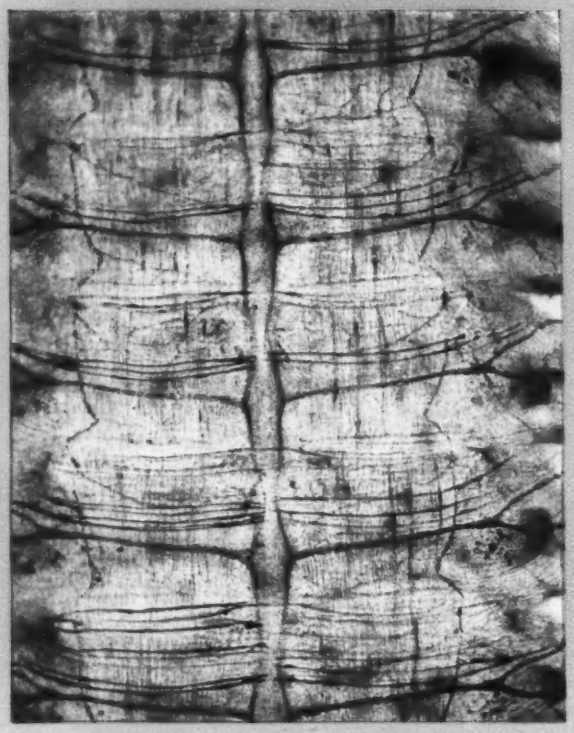


FIGURE 13 – *Coloration in vivo fixée postérieurement. Cordon nerveux de ver marin fixé par le Bleu de Méthylène I.C.I. «A» sans zinc.* *(Aimablement communiquée par le Dr J. E. Smith, Cambridge.)*

FIGURE 14 – *Coloration par imprégnation. Coupe transversale de cerveau de mammifère, méthode de Golgi.*

FIGURE 15 – *Coloration destinée à montrer l'effet du solvant. Coupe longitudinale de tige d'*Hélianthus *colorée par le Noir Chlorazol dissous dans l'alcool benzylique montrant les trous des parois cellulaires colorés en noir.*

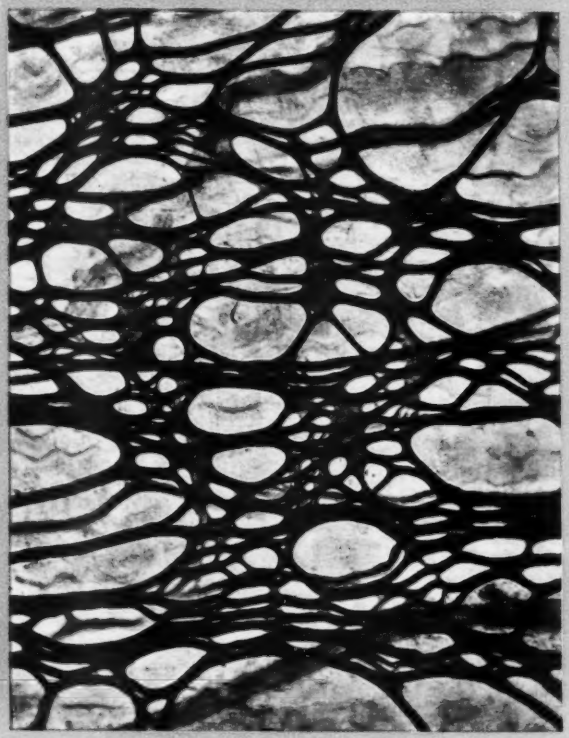


FIGURE 16 – *Coloration sélective. Paroi du corps d'un anatife colorée pendant un temps court par le Noir Chlorazol dissous dans l'alcool éthylique montrant les fibres élastiques colorées en noir violacé.*

éclairant convenablement la préparation. C'est là en fait la question. Certains ont soutenu que toute l'anatomie microscopique devrait se faire par photographies de préparations non colorées, en utilisant peut-être la lumière ultraviolette. Sans doute, de telles méthodes ont donné des résultats précieux dans des cas particuliers. Mais pour les recherches courantes d'anatomie microscopique, comme celles qu'effectue l'auteur, tout ce qu'on peut faire c'est utiliser une bonne source lumineuse et réaliser un emploi optimum des condenseurs et des objectifs du microscope. Il faut une méthode aisée et rapide d'observation que fournissent les colorations du spécimen total ou de coupes, pratiquées avant le montage dans le milieu définitif. L'observation est alors facile mais basée sur les couleurs plutôt que sur les différences d'indice de réfraction. Ce fait a constitué et reste en grande partie la raison d'être de la coloration. La méduse de Sorby montée sans coloration ne serait pas reconnaissable, aussi l'a-t-il colorée dans du porto et on a pu alors en étudier l'anatomie. Il en est exactement de même de nos jours: quand je commence l'étude anatomique de quelque crustacé minuscule je le débite en tranches minces que je colore ensuite afin de les voir aisément sous le microscope.

Naturellement la technique de coloration a fait des pas de géant au cours de ces récentes années. Partie d'une méthode simple destinée à rendre les structures visibles, elle s'est maintenant épanouie dans toutes les directions conduisant à des méthodes précieuses d'analyse de la composition chimique et de l'activité métabolique.

Cependant ce qui m'intéresse ce sont les méthodes utilisées en anatomie et je veux faire ressortir que la plupart des colorations utilisées par les biologistes sont empiriques. Le but de l'anatomie microscopique n'est pas de savoir comment un colorant se comporte dans un cas particulier et pourquoi il en est ainsi; il suffit que l'étude soit facilitée par son emploi. Ce qui est important est que le colorant produise toujours le même effet. En d'autres termes c'est la constance plutôt que la pureté qui compte dans un colorant.

Le Noir Chlorazol E fut découvert accidentellement. Il exsuda d'un morceau de velours noir que j'utilisais comme fond pour la dissection de petits crustacés. Très graduellement après trois semaines de dissection intermittente il avait coloré électivement en vert sombre des structures particulières du squelette que je cherchais à observer dans un spécimen non coloré. Je fis alors bouillir un morceau de ce velours noir dans l'alcool et obtins une solution noire que les chimistes identifièrent pour moi comme étant du Noir Chlorazol E. Evidemment la question ne se posait pas pour moi de savoir pourquoi ce colorant se comportait ainsi.

Par la suite, son étude a montré que le Noir Chlorazol est d'un usage très étendu. Appliqué à des coupes botaniques j'ai immédiatement trouvé qu'il teignait les tissus lignifiés en rose pâle. Après consultation, une firme de produits chimiques a fabriqué un colorant rose qui se trouve normalement à l'état d'impureté dans le Noir Chlorazol E et qu'on appelle maintenant Rose Lignine. Je ne sais si la présence de cette impureté a une action quelconque sur les propriétés générales du Noir Chlorazol mais un échantillon de ce colorant dont on a retiré le rose ne donne pas une coloration aussi précise que le colorant ordinaire.

Dobell en travaillant sur Entamœba a montré que les kystes des amibes intestinales peuvent être identifiées au moyen de la coloration au Noir Chlorazol. Il a trouvé que le noyau et les granulations chromatiques sont colorés en noir franc tandis que la paroi du kyste l'est en vert grisâtre et le glycogène en rouge. D'où une méthode empirique d'identification des différents types d'amibes qui se trouvent dans le tube digestif de l'homme. Cette méthode soit dit en passant peut fournir en une heure des renseignements qui exigeaient au moins une journée par toute autre voie.

Une autre propriété particulière et intéressante du Noir Chlorazol consiste à donner des colorations différentes suivant les différents solvants utilisés. Les formes planktoniques telles que les petites méduses et les petits crustacés prennent une coloration différente suivant que le colorant est dissous dans l'alcool éthylique ou dans l'alcool benzylique. L'action sur les tissus végétaux est encore plus intéressante. Le Noir Chlorazol dissous dans l'alcool éthylique colore les parois des cellules en noir et les autres structures cellulaires en couleurs variant du jaune au noir en passant par le vert grisâtre. Dissous dans l'alcool benzylique il colore sélectivement les trous de la paroi cellulaire. Dans une coupe longitudinale de la tige d'artichaut *Helianthus* la paroi des tubes criblés apparaît ainsi comme une nappe de taches gris sombre se détachant sur un fond incolore (figure 15). Il est difficile d'imaginer une explication de cette différence et c'est pourtant une méthode très précieuse pour l'étude des structures végétales. Elle a été employée comme technique courante dans l'étude de la structure microscopique du bois

par Leighton Hare à Kew (Angleterre). Ce chercheur monte habituellement trois coupes, une colorée dans le Noir Chlorazol aqueux, une autre par une solution dans l'alcool éthylique, la troisième par une solution dans l'alcool benzylique.

Les préparations que j'ai choisies pour illustrer cet article ont été effectuées d'après des techniques couramment employées en anatomie microscopique. La première (figure 1) offre un exemple de coloration générale, elle montre le système nerveux d'un crustacé, séparé par dissection et coloré par l'un des plus communs des colorants: le carmin au borax. Dans une coloration générale le colorant ne doit pas prendre également sur toutes les parties mais il faut que, tous les tissus étant colorés, les noyaux soient colorés plus fortement que les autres constituants cellulaires. Avec le carmin au borax on obtient ce résultat par surcoloration et ensuite lavage de l'excès de colorant à l'alcool acide, procédé auquel on donne le nom de différenciation. On obtient ainsi une préparation entièrement rose dans laquelle on peut facilement repérer les amas de noyaux qui sont restés carmin sombre. La figure 11 offre un exemple simple de coloration générale d'une moisissure *Pénicillium* effectuée grâce au Noir Chlorazol dissous dans l'alcool méthylique. Ici il n'a pas été fait de surcoloration, laquelle serait en fait difficile; il se trouve seulement que le colorant teint plus intensément les noyaux que le cytoplasme, ce qui permet d'éviter la différenciation.

Les deux exemples que je viens de citer montrent la possibilité de colorer les noyaux seuls en laissant le reste du tissu incolore, ce qu'on peut réaliser dans le cas du carmin au borax par différenciation plus poussée et dans celui du Noir Chlorazol par sous-coloration. On est ainsi naturellement amené à des cas de colorants qui se fixent électivement sur un tissu sans agir sur les autres. La figure 16 nous donne une excellente illustration de l'action sélective d'un colorant. Elle met en évidence les tissus élastiques de la paroi du corps d'un anatife, *Lepas*, colorés par le Noir Chlorazol. On a plongé la préparation seulement quelques minutes dans le colorant, en effet, les fibres élastiques noircissent presque immédiatement avant que les autres tissus ne montrent une coloration appréciable. En fait, parmi les colorants spécifiques la plupart se fixent seulement sur un tissu particulier ou un type d'inclusion cellulaire de telle sorte que le temps pendant lequel on y laisse la coupe importe peu. Ainsi le muci-carmin est spécifique des cellules muqueuses et l'orcéine des fibres élastiques.

Une fois établie l'idée de la spécificité des colorants il devient évident qu'on peut obtenir des résultats intéressants par double coloration. Ainsi le Rose Lignine déjà mentionné est spécifique des cellules lignifiées; par mélange avec le Noir Chlorazol on obtient une solution unique qui colore les noyaux et les parois cellulaires en noir alors que les tissus ligneux apparaissent carmin franc (figure 7). L'intérêt de cette solution est de ne pas faire de surcoloration et donc de ne pas nécessiter de différenciation. La figure 8 nous montre un résultat plus difficile à obtenir mais encore plus frappant. C'est une coupe du rein d'un têtard de grenouille colorée d'abord au Pourpre Hickson, donnant une teinte bleuâtre à toutes les cellules, puis au Vert Victoria qui colore sélectivement les globules rouges du sang et aucune autre cellule en vert franc.

Une des doubles colorations les plus simples pratiquée dans les laboratoires médicaux est celle à l'hématoxyline-éosine. Dans ce cas l'hématoxyline colore seulement les noyaux, en bleu pourpre, tandis que l'éosine teint le cytoplasme des cellules en rouge.

On a passé des doubles aux triples colorations et même à des techniques plus compliquées. Les figures 2 et 3 illustrent les multiples effets produits par différentes méthodes bien connues. Il faut pourtant reconnaître que les techniques compliquées parfois préconisées pour l'obtention d'effets multiples sont probablement la plupart du temps trop compliquées. Voici un cas tiré de mon expérience personnelle. Un jour un zoologiste chevronné fatigué de suivre la technique habituelle de la triple coloration de Mallory dont un exemple est fourni par la figure 12, mélangea ses solutions. Il obtint par ce procédé un résultat très satisfaisant; ce n'était peut-être pas la série orthodoxe des couleurs mais les effets obtenus sont inestimables.

Parfois une solution d'un seul colorant peut produire une grande variété de couleurs. Ainsi le Noir Chlorazol en solution dans l'alcool éthylique colore la chitine des appendices de crustacés en gris verdâtre terne tandis que les muscles prennent une teinte brunâtre. La figure 9 nous montre un résultat très agréable de cette métachromasie, comme on appelle ce phénomène. Il s'agit d'une coupe d'alfa prélevée dans un herbier sur un échantillon sec depuis de nombreuses années. Colorée par l'Azurine Chlorazol elle présente un contraste éclatant bleu-rouge.

Très tôt dans l'histoire des techniques de coloration on a recherché des méthodes d'imprégnation

de tissus particuliers, surtout de tissu nervoux. On a trouvé rapidement que les fibres et les cellules nerveuses peuvent fixer les solutions d'or ou d'argent qui par un traitement postérieur, analogue au développement photographique, se transforment en une substance noire. Ces éléments sont ainsi rendus visibles par contraste avec les tissus environnants incolores (figure 5). Un autre exemple nous est fourni par la figure 6 qui montre les terminaisons nerveuses dans un muscle strié de vertébré. La technique de Golgi (figure 14) permet d'obtenir un résultat plus marqué: des cellules nerveuses apparaissent individuellement d'un noir intense. Cependant si ces techniques d'imprégnation sont très intéressantes et précieuses il faut se rappeler qu'elles sont capricieuses et que dans une masse de tissu on ne peut prédire quelles sont les cellules, s'il en existe, qui s'imprégneront ni celles qui ne seront pas affectées par le traitement.

Au cours de ces récentes années nous avons assisté au rapide développement des méthodes *in vivo* dans lesquelles ce sont les cellules vivantes qui prennent le colorant. Ainsi on peut utiliser le Rouge neutre ou le Bleu de Méthylène pour colorer spécialement des cellules particulières ou certains constituants cellulaires dans des tissus vivants. Originellement la difficulté était de fixer les cellules après leur coloration. Mais on a maintenant découvert des méthodes qui permettent de réaliser cette fixation. La figure 13 nous montre un très joli effet produit par la coloration du cordon nerveux d'un ver marin au Bleu de Méthylène, avec fixation postérieure du colorant. Chacune des fibres nerveuses est colorée en bleu franc.

L'orientation moderne des recherches sur les colorations porte à utiliser cette méthode comme moyen d'analyse de la physiologie de la cellule plutôt que de son anatomie. Ce nouveau sujet n'entre pas dans le plan de ce court article, mais nous citerons encore un exemple qui semble devoir être mentionné parce que concernant à la fois l'anatomie et la physiologie. Baker, à Oxford, a montré qu'en injectant du Noir Chlorazol à des souris certaines cellules appelées histiocytes ou macrophages situées sous la peau captent le colorant si bien qu'elles apparaissent noires en coupe (figure 4). Cette méthode nous permet non seulement de distinguer anatomiquement les histiocytes, mais nous démontre aussi leur comportement phagocytaire.

Oliver Heaviside (1850–1925)

Il convient de célébrer cette année le centenaire de la naissance d'Oliver Heaviside. (Londres, 1850). Heaviside ne reçut pour ainsi dire aucune instruction dans ses jeunes années. En 1870, nous le trouvons télégraphiste à Newcastle upon Tyne. Il ne se maria pas et demeura avec ses parents qui s'étaient installés dans le Devonshire en 1889 jusqu'à leur mort. Il vécut ensuite dans une réclusion presque complète, toujours au Devonshire. Son génie ne fut cependant pas méconnu et il fut élu à la *Royal Society* dès l'âge de quarante et un ans.

Heaviside rendit de nombreux services à la cause des progrès de l'électricité. Il conçut le circuit dans lequel grâce à une mise au point convenable de la résistance, de l'inductance, de la capacitance et de la déperdition, des signaux non déformés pouvaient, bien qu'atténués, se propager le long d'un câble et ainsi conserver leur intelligibilité.

L'apport notable d'Heaviside à l'électricité se trouve dans une série d'articles qui parurent dans la revue *The Electrician*. C'est dans ces articles qu'il exposa sa théorie de la propagation des ondes. Parmi les résultats importants qu'il obtint, il faut citer sa prévision d'une couche ionisée dans la partie supérieure de l'atmosphère.

Le Dr W. H. Eccles montra quelles importantes conséquences en résultaient pour la propagation des ondes de T.S.F. autour de la terre et lui donna en 1911 le nom de «couche d'Heaviside». Le calcul opérationnel d'Heaviside, qui est à la base de l'analyse moderne des circuits électriques, représente un des outils mathématiques les plus puissants à la disposition de l'ingénieur électricien.

Interférométrie à faisceaux multiples

S. TOLANSKY

L'auteur traite des applications d'interférométrie à faisceaux multiples à l'étude des métaux: examen du poli superficiel, mécanisme de production des micro-entailles dans les essais de dureté, formation des bandes de glissement dans les cristaux métalliques étirés. Il détaille les utilisations de la technique à l'étude de la croissance cristalline des minéraux durs, de l'anisotropie de dureté du diamant soumis aux essais d'abrasion, et des modes de vibration des quartz piézoélectriques. Pour conclure, description d'une nouvelle méthode d'obtention de franges fines, et adaptation d'une ancienne technique à la mise en évidence des clivages, des inclusions et des pailles dans le mica.

L'emploi d'interférométrie à faisceaux multiples s'est maintenant imposé dans l'étude de la micro-topographie [1] et du micro-mouvement [2] des surfaces. Dans ces recherches, il faut d'abord préparer la surface à étudier pour lui donner un pouvoir réflecteur élevé; on la compare ensuite à une surface optiquement plane argentée convenablement. Si les conditions optiques sont réalisées, les réflexions multiples des faisceaux produisent un système de franges très fines entre les surfaces. Ces franges fines sont en fait des micro-courbes de niveaux topographiques, et avec une technique appropriée, on peut déceler des variations de hauteur sur la surface jusqu'à un millième d'une longueur d'onde lumineuse, soit environ 5 Å. Cette quantité est moindre que bien des dimensions réticulaires cristallines, et, en fait, on a pu mesurer des fissures cristallines par cette méthode, avec des ondes lumineuses ordinaires. Les techniques ne peuvent pas permettre l'examen d'étendues superficielles trop petites, et la région la plus réduite susceptible d'examen précis est la surface que limite un carré de 0,004 mm.

MÉTAUX

Après une finition et un polissage très soignés, on a des franges fines rectilignes. Réciproquement, toute rugosité de la surface se mesure aux irrégularités des franges. L'importance d'un finissage à haut poli pour les surfaces métalliques s'accroît sans cesse dans l'industrie de précision. Dans ce domaine, il y a beaucoup à attendre des techniques à faisceaux multiples pour l'examen des surfaces. On voit sur la figure 1, les franges que donne un acier inoxydable typique, bien poli, avec un grossissement d'environ 300. On réalise tout de suite l'importance des irrégularités superficielles, si l'on se souvient que d'une frange à la suivante, la hauteur change d'une demi-longueur d'onde, soit environ $2{,}5 \times 10^{-5}$ cm.

Sur la figure 2 se trouvent les franges que donne une surface très bien polie d'acier inoxydable, avec finissage super-microscopique. Par contre, la figure 3 révèle la rugosité relative de l'aluminium poli qui, plus mou, est abrasé plus facilement. Sur la figure 4 se voient les contours que donne une feuille d'acier laminé (qui joue le rôle de support dans le fer étamé), et le grain de laminage se révèle très nettement [3].

Une méthode généralisée pour mesurer la dureté d'un corps consiste à laisser tomber sur sa surface, une pyramide en diamant sous une charge donnée, et à mesurer ensuite les dimensions superficielles de l'entaille (Essai Vickers de dureté). Ces essais s'effectuent souvent maintenant à l'échelle microscopique, avec des entailles très petites, ayant souvent moins de 10 microns de large. Il est évident qu'à la pénétration du diamant, la surface environnante se déforme presque à coup sûr et l'on a maintenant étudié ces déformations par interférométrie [4]. On voit sur la figure 5 les franges qui révèlent la belle symétrie des déformations superficielles produites par une entaille microscopique dans une surface d'acier poli. On voit sur la figure 6 ce qui se passe quand on accroît la charge. Le métal s'accumule le long des côtés de l'entaille carrée, mais il n'y a pas de déformation importante dans la direction des diagonales.

Quand on fait l'essai sur un monocristal d'étain [5], on obtient l'empreinte asymétrique remarquable de la figure 7. Apparemment la grande aile correspond à des collines en relief et la petite aile est une région de dépression en vallées. Il a été démontré que cet effet est purement cristallographique, et en relation directe avec la direction des axes du cristal.

Le travail sur les bandes de glissement [6], est riche de promesses. Pour des cristaux métalliques sous tension, les bandes de glissement traditionnelles apparaissent comme une série de fines lignes

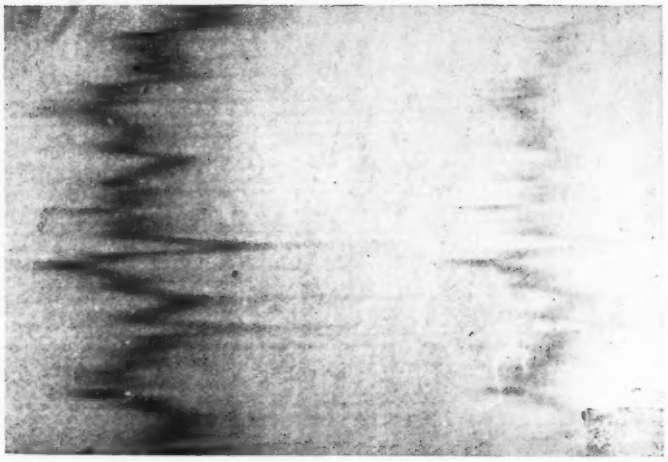


FIGURE 1 – *Franges données par un échantillon bien poli d'acier inoxydable.* (× 300)

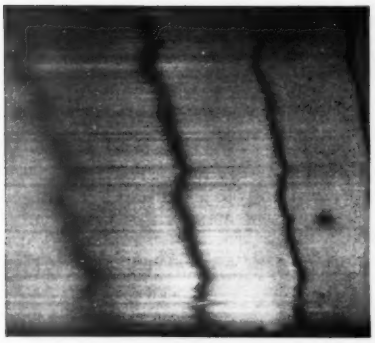


FIGURE 2 – *Franges de l'acier inoxydable, avec finissage «supermicro».* (× 120)

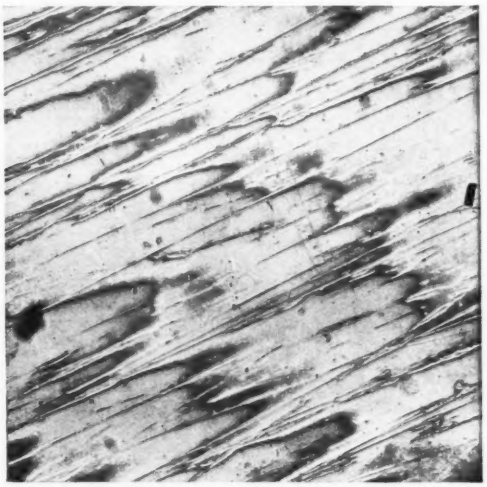


FIGURE 4 – *Franges d'une feuille d'acier laminé.* (× 360)

FIGURE 3 – *Contours relativement irréguliers dus à l'aluminium, métal assez mou, donc facilement abrasé.* (× 720)

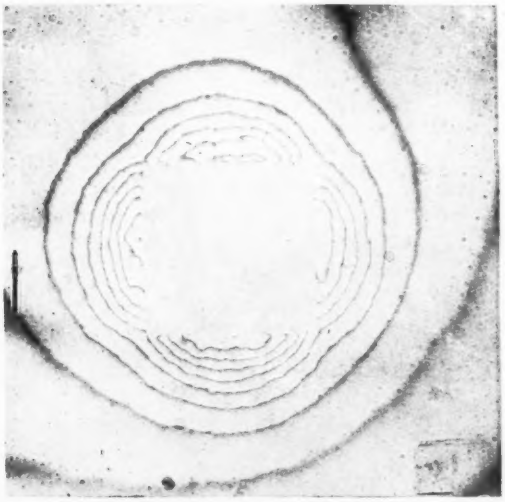


FIGURE 5 – *Distorsions superficielles, dans l'essai de dureté microscopique, révélées par interférométrie.* (× 120)

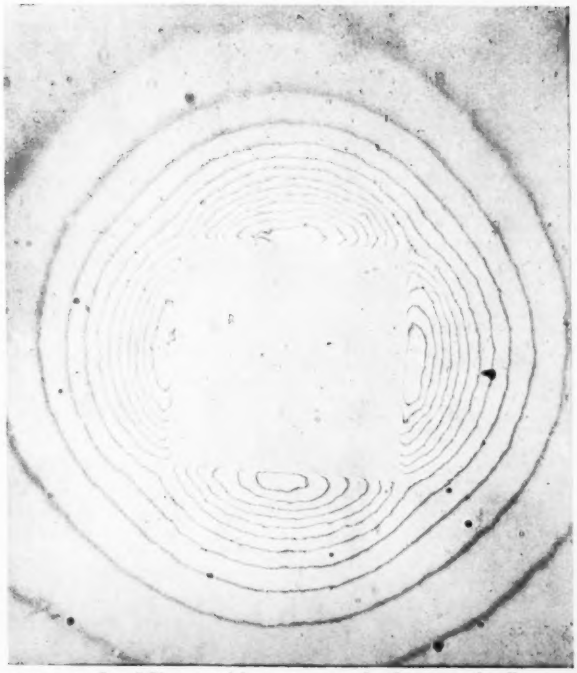


FIGURE 6 – *Même expérience que sur la figure 5: le diamant pyramidal de l'appareil d'essai portait une charge supérieure.* (× 120)

FIGURE 7 – *Contours asymétriques, lorsqu'on effectue le micro-essai de dureté sur un monocristal d'étain.* (× 120)

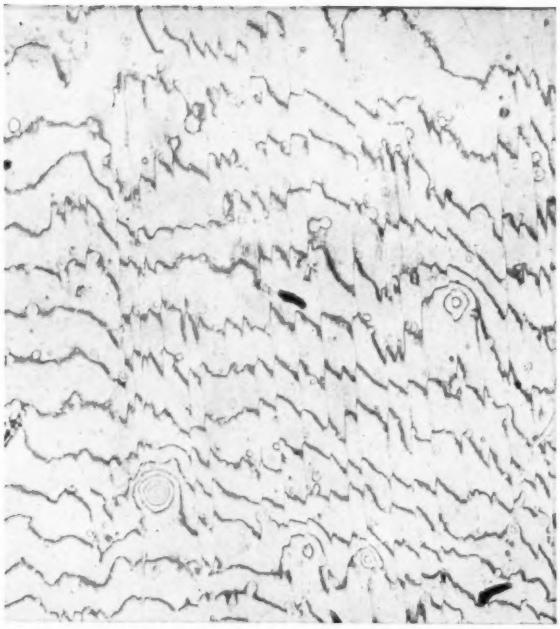


FIGURE 8 – *Diagramme interférométrique des bandes de glissement qui se produisent dans un monocristal d'aluminium sous tension.* (× 250)

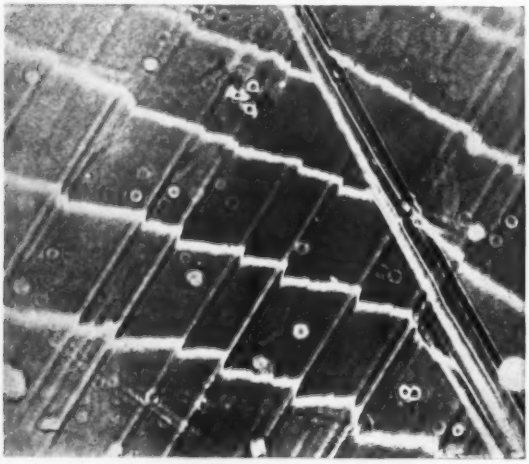


FIGURE 9 – *Superposition des franges sur microphotographie ordinaire des bandes de glissement d'un monocristal d'étain.* (× 250)

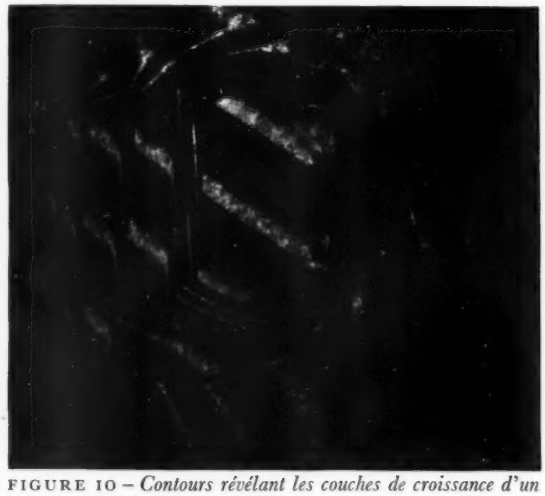


FIGURE 10 – *Contours révélant les couches de croissance d'un cristal de béryl.* (× 50)

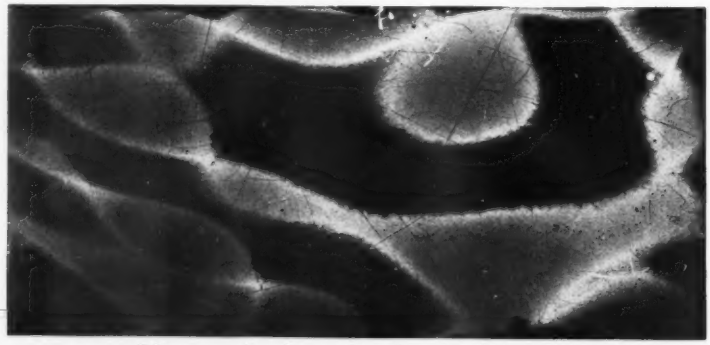


FIGURE 11 – *Diagramme interférométrique d'un cristal de quartz vibrant à haute fréquence, avec nœuds et ventres.* (× 10)

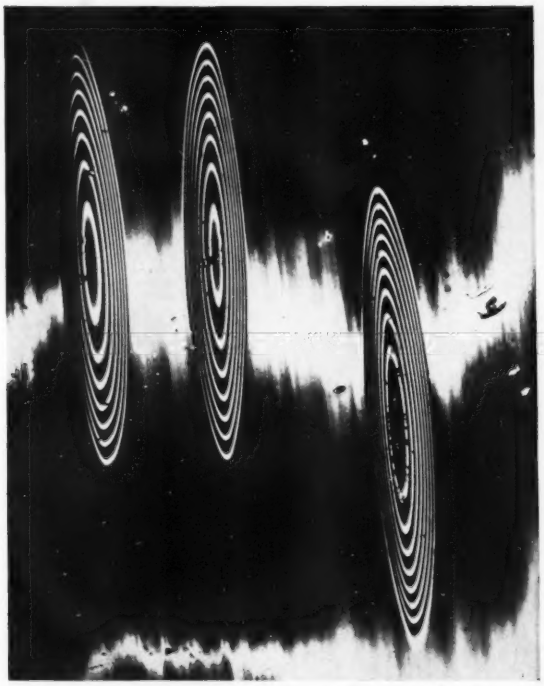


FIGURE 12 – *Franges dans l'essai de micro-abrasion qui emploie une petite meule rotative sertie de poussière de diamant.* (× 120)

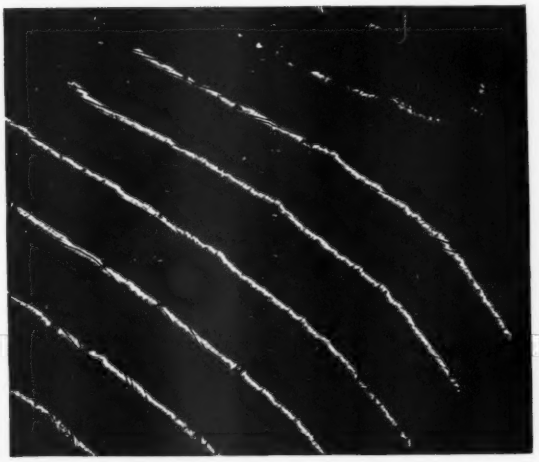


FIGURE 13 – *Franges d'une surface de diamant spécialement préparée. Leur finesse indique un degré de poli exceptionnel.* (× 25)

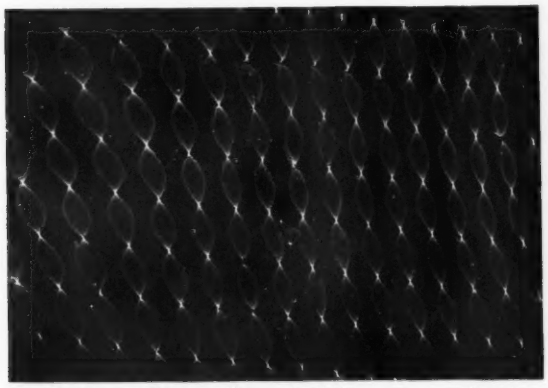


FIGURE 14 – *Franges d'un cristal de quartz en vibration.* (× 10)

FIGURE 15 – *Les plans de clivage du diamant ont une structure normalement très complexe: dans l'exemple ci-dessus, les franges révèlent un clivage exceptionnellement propre.* (× 120)

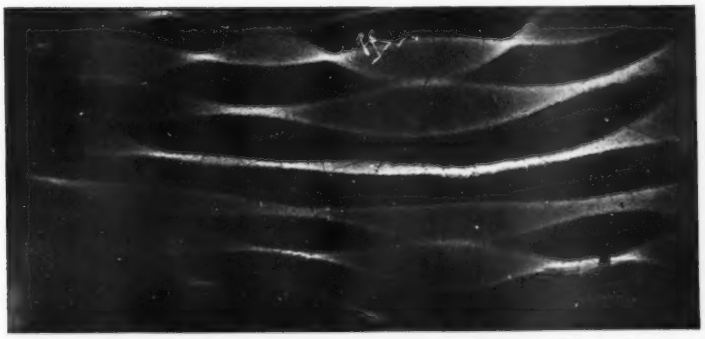


FIGURE 16 – *Franges d'un cristal de quartz vibrant.* (× 10)

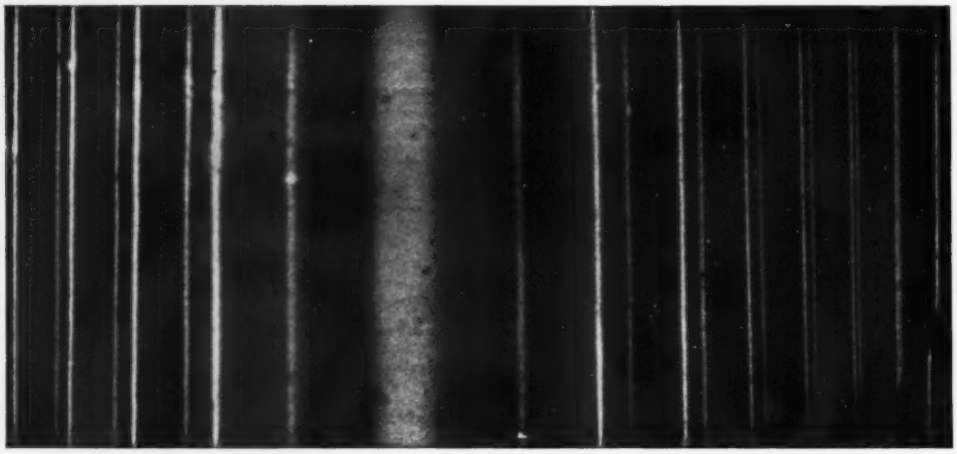


FIGURE 17 – *Franges obtenues par un nouveau dispositif: une lame parallèle de mica, argentée sur les deux faces, et fortement incurvée.* (× 10)

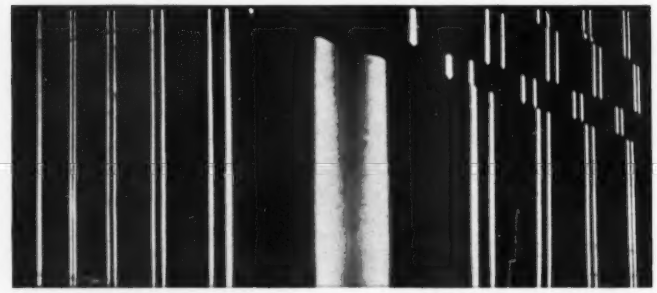


FIGURE 18 – *Comme ci-dessus, mais avec une lame de mica présentant des échelons de clivage.* (× 10)

FIGURE 19 – *Franges de deux lames de mica argentées approximativement parallèles: de minimes variations d'épaisseurs dans le mica, même d'une seule couche réticulaire, produisent des couleurs vives.* (× 10)

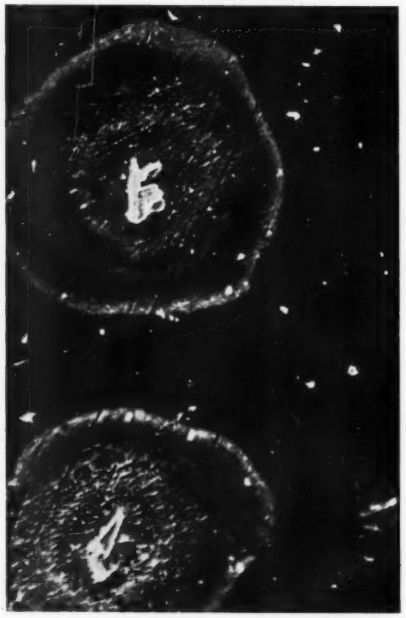


FIGURE 20 – *Emploi de l'interférométrie pour révéler des inclusions normalement invisibles dans le mica.* (× 25)

parallèles rapprochées. On voit sur la figure 8 les franges en travers des bandes de glissement, que donnent des monocristaux d'aluminium, après l'application d'une légère tension. On a mis ainsi en évidence la structure en escalier des bandes de glissement, et rendu facile l'étude quantitative du phénomène. Sur la figure 9, on a superposé le dessin des franges à une micrographie ordinaire des bandes de glissement d'un monocristal d'étain.

SURFACES CRISTALLINES

On s'est borné volontairement à travailler sur les surfaces cristallines naturelles des minéraux durs (diamant, béryl, topaze, quartz). Ce sont les plus susceptibles de conserver leur surface primitive.

Le béryl a donné récemment des indications précieuses sur le mécanisme de la croissance des cristaux [7]. Il donne lieu à un système de contours interférentiels extrêmement complexe. On en voit sur la figure 10 un exemple typique — donné, faute de place, sans explications.

On fait beaucoup de recherches sur le diamant: allures caractéristiques de la croissance naturelle, directions différentielles de polissage, contours des facettes de clivage. En particulier, on étudie l'anisotropie de la dureté par l'analyse interférométrique d'un essai d'abrasion proposé récemment [8]. Dans cet essai, une petite meule tranchante d'acier, sertie de poussière de diamant est appliquée contre la surface sous une pression standard, à une vitesse standard, pendant un temps donné. Il s'ensuit une coupure par abrasion microscopique très peu profonde. L'évaluation du volume de cette coupure donne une mesure de la résistance au broyage et à l'usure par polissage. Par des orientations convenables de la roue, on peut étudier les propriétés particulières de résistance du diamant suivant la direction. Il n'y a que par l'interférométrie de précision qu'on peut déterminer ces volumes de façon satisfaisante. On voit sur la figure 12 les franges que donnent un certain nombre de ces micro-entailles [9]. Non seulement, formes et volumes sont déterminés, mais encore, la définition précise des franges à l'intérieur de l'entaille montre que les surfaces abrasées prennent un poli exceptionnel.

L'interférométrie a montré que le fini ultime de la surface qu'on pouvait obtenir à partir d'un diamant spécialement poli était d'une qualité surprenante. On voit sur la figure 13 la meilleure réussite jusqu'à présent dans ce domaine: on reconnaîtra, à la finesse des franges, qu'on a obtenu une surface optiquement plane excellente. On n'a pu y arriver que par l'examen répété des franges au cours du polissage, pour guider les progrès de celui-ci. Des études sous grossissement élevé révèlent un grain qui prouve qu'il n'y a pas eu d'écoulement au cours du polissage.

L'examen interférométrique a montré que les clivages du diamant étaient normalement très complexes. Cependant, un échantillon particulièrement beau a donné les franges de la figure 15. Ceci a permis une interprétation quantitative exacte.

CRISTAUX PIÉZO-ÉLECTRIQUES

Récemment [10], l'application de l'interférométrie à faisceaux multiples à l'étude des oscillations mécaniques de cristaux de quartz excités électriquement a conduit à des résultats spectaculaires. On a étudié avec succès des cristaux vibrants dans un intervalle considérable de fréquence (100–3000 kc/s). Dans ces expériences, on produit de fines franges d'interférence entre la surface d'un cristal parfaitement poli, et une surface optiquement plane. Lorsque le cristal est mis en mouvement par un circuit électrique convenable, certaines portions de la surface restent au repos (nœuds) et les autres vibrent. Une amplitude de vibration même d'une petite fraction de longueur d'onde suffit à produire un changement de distance mesurable entre le cristal et le plan optique. Par suite, au-dessus des régions en mouvement, les franges s'élargissent, et toute la distribution superficielle des vibrations se trouve révélée, malgré la faible amplitude et la fréquence très élevée de celles-ci.

Les figures 11, 14 et 16, sont des images vibrationnelles caractéristiques, et donnent manifestement des renseignements considérables. C'est ainsi que, par exemple, on connaît la distribution des nœuds et des ventres, et qu'on peut mesurer avec une grande précision l'amplitude aux ventres. Des irrégularités ou des pailles du cristal se révèlent par des anomalies du diagramme. On a établi que certains des nœuds sont des régions où le cristal n'effectue certainement pas d'oscillation d'amplitude supérieure à moins de 50 Å. On vient aussi de mettre au point une technique stroboscopique, où une fraction de la tension oscillante est détournée du cristal, et employée à l'excitation de la source lumineuse utilisée pour produire les franges. Comme la source et le cristal vibrent à la même fréquence, on obtient une image instantanée des franges, avec la surface en repos apparent. De cette façon, on peut non seulement déterminer les nœuds, les ventres et les amplitudes, mais encore les phases instantanées

et les directions des mouvements anisotropes sur la totalité de la surface du cristal. Car les franges ne s'élargissent pas, mais se tordent et s'incurvent autour des régions qui sont au même niveau instantané.

NOUVELLES TECHNIQUES INTERFÉROMÉTRIQUES

On a mis au point un nouveau type de système de franges [11]. Son intérêt n'est, pour le moment, que théorique, mais des applications surgiront peut-être plus tard.

Voici le mode de production de ce système: une feuille mince à lames parallèles, flexible et transparente (de mica, par exemple) est argentée sur les deux faces, puis courbée de façon cylindrique avec un rayon voisin de 5 cm. Si elle est illuminée en lumière monochromatique parallèle, on a un système de franges très fines, localisées dans un plan passant par le centre de courbure, et perpendiculaire à la direction de la lumière incidente.

On en voit un exemple sur la figure 17. Elles sont très fines et doubles. Les deux composantes sont polarisées rectilignement dans des directions perpendiculaires, à cause des propriétés biréfringentes du mica. Celui-ci produit d'ailleurs plusieurs effets, très complexes et très intéressants, dont la théorie rend parfaitement compte. Si le mica a des dénivellations dues au clivage à sa surface, elles apparaissent sur la figure d'interférence, comme on le voit sur la figure 18. Cette observation suggère des possibilités d'applications, indépendamment de l'intérêt optique intrinsèque du système. On peut facilement déposer de minces pellicules ou couches sur une feuille de mica, ou tout autre matériau flexible convenable. En courbant, on obtient comme résultat l'épaisseur d'une dénivellation équivalente, qui représente l'épaisseur de la pellicule. L'intérêt du procédé tient à la haute dispersion et l'excellente définition des franges obtenues par des procédés optiques d'une extrême simplicité, et très peu coûteux.

Comme nouvelle application d'une vieille technique [12], on a adapté de façon simple le principe traditionnel de superposition, pour l'appliquer aux franges de faisceaux multiples d'égale épaisseur (introduites il y a des années par Fabry). Dans cette expérience, on peut révéler avec clarté et précision par un dispositif simple les inclusions infimes, et normalement invisibles dans le mica, ou les petits changements d'épaisseur au clivage. Un morceau de mica est argenté puis coupé en deux, les deux morceaux sont maintenus ensemble, approximativement parallèles. On l'illumine en lumière parallèle blanche, et il en résulte de magnifiques colorations. Si le mica avait une épaisseur uniforme, on n'observerait qu'une teinte uniforme, mais l'on sait que les feuilles de mica présentent de légères discontinuités d'épaisseur, petites dénivellations locales de clivage, d'épaisseur variable, quelquefois hautes seulement d'une couche réticulaire monomoléculaire (20 Å). Par suite du principe de superposition, même si le mica est assez épais, on obtient effectivement des interférences correspondant à une différence de marche représentée par la petite dénivellation. Les aires de clivage se révèlent ainsi par des régions magnifiquement colorées de teintes uniformes. On a en fait, des franges de lumière blanches d'une grande sensibilité, bien qu'on se serve de pellicules épaisses. La figure 19 (en noir et blanc) ne donne qu'une faible idée des contrastes obtenus, car l'original présente des couleurs splendides. Un échelon de clivage haut d'une seule couche réticulaire produit un brillant changement de couleur.

Egalement intéressante est la sensibilité du système pour révéler les inclusions «invisibles» au sein du mica. On en voit sur la figure 20 un exemple, (qui, là encore, perd beaucoup à la reproduction en noir et blanc). Là se révèle une petite inclusion. En son centre, on peut voir un petit cristal étranger, entouré d'une région caractéristique. Le contraste vient des différences d'indice de réfraction des corps examinés.

BIBLIOGRAPHIE

[1] TOLANSKY, S. «Multiple-beam Interferometry of Surfaces and Films». Clarendon Press, Oxford. 1948.

[2] TOLANSKY, S., et BARDSLEY, W. *Nature*, **161**, 925, 1948.

[3] TOLANSKY, S. *Metal Treatment*, **61**, N° 60, 195, 1950.

[4] TOLANSKY, S., et NICKOLS, D. G. *Nature*, **164**, 103, 1949.

[5] *Idem. Ibid.*, **164**, 840, 1949.

[6] TOLANSKY, S., et HOLDEN, J. *Ibid.*, **164**, 754, 1949.

[7] GRIFFIN, L. J. Résultats non publiés.

[8] GRODZINSKI, P., et STERN, W. *Nature*, **164**, 193, 1949.

[9] TOLANSKY, S., et AUSTIN, E. *Ibid.*, **164**, 194, 1949.

[10] TOLANSKY, S., et BARDSLEY, W. *Ibid.*, **161**, 925, 1948.

[11] TOLANSKY, S., et BARAKAT, N. *Ibid.*, **162**, 816, 1948.

[12] TOLANSKY, S. *Ibid.*, **163**, 637, 1949.

Progrès récents des lampes à décharge dans les gaz rares

J. N. ALDINGTON

Le tube de Moore, premier tube à décharge rempli de gaz ayant fonctionné d'une façon satisfaisante comme source lumineuse, est brièvement décrit. Suit un compte-rendu des travaux plus récents sur les décharges de courants à forte densité dans les gaz rares d'où résultèrent les tubes à xénon et à krypton donnant une lumière blanche intermittente très éclairante, d'une durée de 200–450 μs. Les recherches aboutirent enfin à l'arc à gaz qui est étudié en plus grand détail. Il s'agit là d'une lampe à décharge dans un gaz rare donnant une lumière continue, et comprenant un tube de quartz refroidi à l'eau et des électrodes de tungsten; à 5 kW elle a une luminosité de 5000 bougies/cm^2 et un pouvoir éclairant de 30 l/W, qu'elle atteint immédiatement dès l'allumage.

Les radiations lumineuses et d'autre nature produites par une décharge électrique dans l'air raréfié ou d'autres gaz ont fait l'objet de recherches depuis de nombreuses années. Les premiers tubes à décharge utilisés étaient ordinairement en verre et renfermaient le gaz étudié sous une pression relativement faible. La décharge elle-même était produite par une source à haute tension telle qu'une bobine d'induction ou un transformateur, et le courant était généralement de l'ordre de quelques milliampères seulement.

A l'exception du tube de Moore qui parut sous une forme commerciale en 1907, ces premiers tubes remplis de gaz n'offraient pas grande possibilité d'éclairage généralisé. Considérons d'abord la lampe de Moore en quelque détail. Elle consistait en un tube de verre de 60 m de longueur environ, que l'on fabriquait et montait sur place. Il semble que les meilleurs résultats aient été obtenus avec des tubes de 4,5 cm de diamètre; la couleur et le pouvoir éclairant de la lumière variaient avec le gaz contenu dans le tube. Dans certains tubes où l'on utilisait l'azote, la lumière était d'une douce couleur dorée; ceux contenant du gaz carbonique donnaient une lumière blanche semblable à celle du ciel au septentrion.

Toutefois, seul le néon se trouva donner une lumière capable d'un rendement commercial et grâce aux travaux de Georges Claude, le tube au néon devint la première lampe à décharge dans un gaz rare utilisée à fin publicitaire et commerciale. La première démonstration (1907) fut le début de toute une série de tubes à décharge fonctionnant à haut voltage et à cathode froide et produisant toute une gamme de couleurs; la décharge élémentaire revenait toujours cependant au néon ou à un mélange de néon/argon et vapeur de mercure.

Par la suite, on eut l'idée de recouvrir l'intérieur des tubes à haut voltage d'une couche fluorescente et le nombre de couleurs possibles fut grandement accru. Ces tubes à leur tour donnèrent naissance à la lampe fluorescente à voltage normal qui est en train d'acquérir une importance considérable dans l'éclairage courant. Dans l'intervalle, les travaux sur les décharges simples dans les gaz rares étaient en grande partie limités aux recherches fondamentales ou à la production de certains types spécialisés de lampes de laboratoire.

Au cours des années approchant 1940, nous commençâmes une série de recherches comportant le passage de décharges à haute tension dans les gaz rares et au début de 1939, on avait acquis des connaissances préliminaires sur les tubes à décharge où des courants d'ampérage élevé passaient dans des tubes de verre en borosilicate de 3 cm de diamètre environ. Ils contenaient du néon, de l'argon et de l'hélium à des pressions relativement faibles.

On découvrit que le spectre de la radiation produite était semblable à celui fourni par les tubes de Claude qui fonctionnaient d'ordinaire avec des courants de 25–50 mA seulement. Le pouvoir éclairant de la lumière était cependant assez faible, bien que l'on utilisât des électrodes émissives à perte réduite, parce que la chute de tension dans les lampes expérimentales était de l'ordre de 30 V seulement, la longueur de l'arc étant généralement de 20 cm. On pensa que les conditions de pression et de courant qu'il faudrait étudier, demanderaient un type différent de tube et sans doute de nouveaux montages de circuit si

l'on voulait explorer d'une façon même préliminaire les possibilités entrevues. L'objectif était de produire une lampe à foyer intense et à grande puissance.

RECHERCHES SUR LES DÉCHARGES DE CONDENSATEUR

En dépit de l'insuccès rencontré dans les premiers essais de production d'une source de lumière puissante utilisant les gaz rares, on pressentit la possibilité d'obtenir une telle source en faisant passer à travers le gaz une énergie suffisante. La technique de décharge d'un condensateur, par exemple, avait été utilisée avec succès pendant de nombreuses années pour produire dans l'air des étincelles de courte durée. On pensa donc à placer un tube à décharge dans l'espace réservé pour l'étincelle.

En principe, la méthode consistait à charger un condensateur jusqu'à un voltage élevé, puis de rendre la lampe conductrice en produisant une décharge ionisante à haute fréquence et fort voltage sur les parois de la lampe. L'état conducteur atteindrait alors un maximum en quelques millionièmes de seconde et l'énergie emmagasinée dans le condensateur se déchargerait très rapidement à travers la lampe.

Dans les premiers travaux expérimentaux effectués dans nos laboratoires,[1] des tubes de verre en borosilicate de longueur et de diamètre divers étaient remplis de quelques mm d'argon et de vapeur de mercure sous faible pression.

L'objectif en vue à ce stade du développement était de faire passer une décharge à très haute densité de courant dans la vapeur de mercure à basse pression, mais l'examen spectroscopique de la radiation prouva qu'une très faible quantité de vapeur de mercure était présente et que la décharge était presque entièrement transportée par le gaz rare.

On décida donc d'étudier les décharges de condensateur dans les gaz rares seuls. On obtint immédiatement quelques résultats intéressants. Ainsi, à mesure qu'augmentait la quantité d'énergie déversée dans le tube, la qualité de la radiation changeait et des spectrographes révélèrent qu'une radiation continue s'établissait lorsqu'on atteignait les plus fortes densités de courant et que le spectre discontinu caractéristique de l'élément gazeux dans le tube devenait moins dominant (voir figure 1). Par la suite on produisit des tubes où un tube intérieur ou guide était scellé au tube extérieur par le rebord de l'une de ses extrémités. Ce dispositif fut adopté afin de permettre l'expansion et le mouvement nécessaires lorsque se produisent l'onde de choc et l'élévation de température résultant du déclenchement de la décharge.

On trouva que de tels tubes étaient capables de transporter des courants considérables pendant de très courtes durées; quelques exemples typiques sont donnés au tableau.

Type	*Valeur en joules*	*Nombre approché de lumens sec.*	*Durée effective* (μ *sec.*)	*Usage*
SF4	400	16.000	450	Tubes droits à usage scientifique
SF5	200	7.000	350	
SF6	100	3.000	200	

On remarqua au cours des travaux sur ce genre de décharge que l'arc ne remplissait pas complètement l'intérieur du tube (voir la figure 3, qui montre une décharge de 200 joules passant dans un tube rempli de xénon). Grâce à de telles photos on put mesurer la largeur approximative de l'arc d'où l'on calcula que la densité moyenne de courant dans la décharge était de l'ordre de 1000 A/cm^2 au minimum.

Ces observations jointes à des mesures de l'efficacité lumineuse de la décharge démontrèrent que le développement d'une radiation continue à partir du tube à décharge-éclair coïncidait avec celui d'un pouvoir éclairant suffisamment élevé. En mesurant minutieusement la totalité du flux émis par le tube SF4 en même temps que l'énergie libérée par le condensateur, on s'aperçut que des valeurs de l'ordre de 40 lumens par watt étaient possibles pour un tube au xénon et de 30 l/W pour le krypton. Dans les deux cas la couleur était blanche et la distribution d'énergie spectrale rappelait celle de la lumière du jour, bien qu'il y eût prédominance d'énergie à l'extrémité bleue du spectre et en quantité supérieure à celle qui existe dans la lumière naturelle. On produisit une série de quelque dix types différents de tubes et nombreuses furent les utilisations de ces tubes à décharges répétées, non seulement sous leur forme droite primitive, mais aussi des formes plus resserrées où le tube à décharge proprement dit est tordu en vrille comme dans la figure 2.

Cette réussite donna un nouvel élan aux travaux visant à produire une source de lumière intense mais continue, et enfin, en 1947 parut l'arc à gaz rare.

L'ARC À GAZ RARE

Nous donnons le nom d'«arc à gaz rare» aux lampes à décharge dans les gaz rares opérant dans

[1] ALDINGTON, J. N., *Endeavour*, 7, 21, 1948.

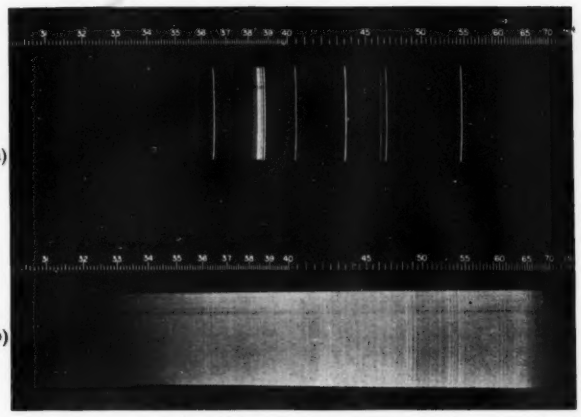


FIGURE 1 – (a) *Décharge d'un courant faible dans le krypton.* (b) *Décharge d'un courant élevé dans le krypton.*

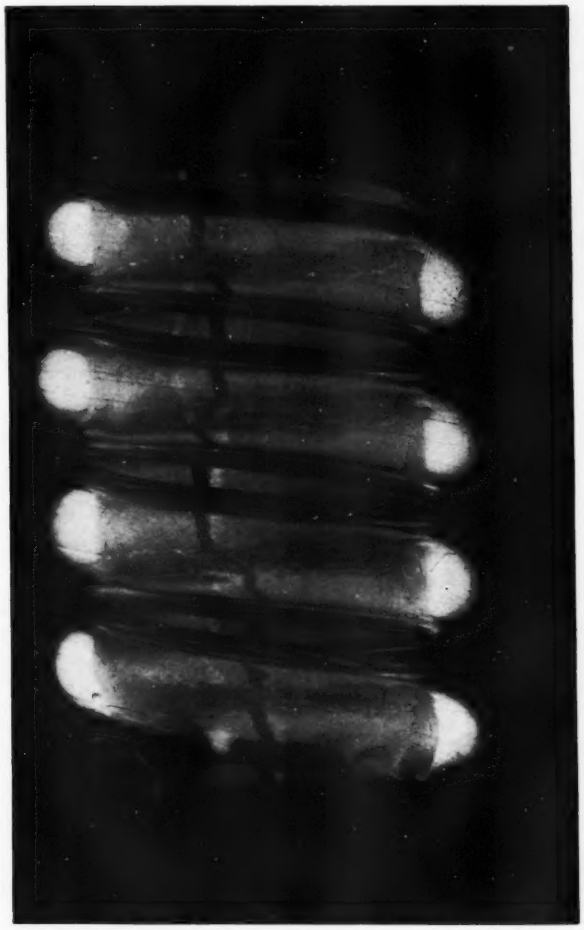


FIGURE 2 – *Tube à décharge-éclair en forme d'hélice compacte.*

FIGURE 3 – *Décharge de 200 joules dans un tube rempli de xénon.*

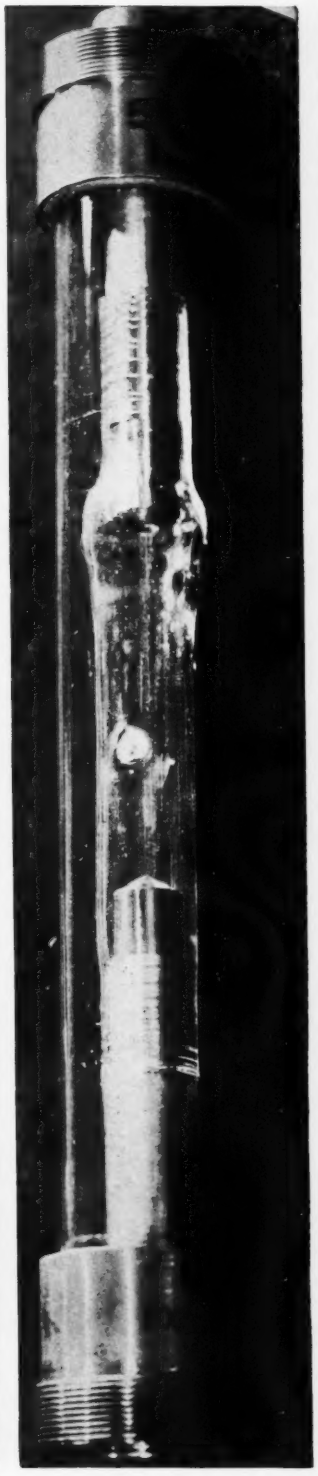


FIGURE 4 – *Arc à gaz rare complet dans son enveloppe d'eau.*

les conditions d'une lampe à arc, mais émettant une radiation semblable à la lumière du jour. Cette radiation est caractérisée par un spectre continu intense s'étendant de l'ultra-violet jusqu'à l'infra-rouge et comprenant toute la zone visible. Nous avions déjà remarqué que, tandis qu'une décharge à basse pression dans l'argon produisait une radiation bleuâtre d'intensité et de luminosité faibles, à des pressions plus élevées et avec des courants de densité très forte, il émettait sous une excitation convenable une intense lumière blanche de grand pouvoir éclairant. Comparés aux résultats obtenus dans le tube à décharge éclair, les possibilités du krypton et du xénon parurent encore plus encourageantes et il fut décidé d'étudier leur comportement sous des pressions et des densités de courant variées. Il s'agissait en somme de déterminer la possibilité d'exciter avec les matériaux disponibles, les gaz rares purs ou en mélange jusqu'à l'obtention d'un spectre continu et unifié et aussi de mettre au point une lampe pratique suffisamment lumineuse.

Un certain nombre de problèmes importants se posent immédiatement dès que l'on envisage la fabrication d'un tube devant renfermer un gaz donné. Quelle température atteindront les parois du tube et quelle matière employer? Quelle sera la température des électrodes au moment de la décharge? La stabilité physique et chimique des électrodes est-elle suffisante? L'idéal est évidemment une lampe à décharge à enveloppe faite d'une substance transparente réfractaire, nullement altérable par le passage de la décharge, des électrodes incapables de crépitement ou d'évaporation et un gaz interne émettant son maximum de lumière du jour dès que la lampe est branchée dans le circuit.

Les travaux antérieurs avaient montré, comme dans la figure 3, qu'une décharge contenue se produisait dans le krypton et le xénon à des pressions très basses en raison du poids atomique élevé et du peu de mobilité de ces deux corps. Une décharge ainsi contenue tend à être très mobile et aisément influençable par des courants de convection et du champ électrique. Afin d'obtenir dans la pratique une décharge convenable, il parut nécessaire de laisser aussi peu d'espace que possible à l'arc et de réduire également au minimum les courants de convection suscités dans le gaz, grâce à une forme appropriée de l'enveloppe.

Une lampe de forme tubulaire et de charge relativement forte semblait être la meilleure solution. Quant à la matière à employer pour le tube, les considérations énoncées plus haut faisaient voir que seul le quartz donnerait satisfaction. Pour une charge de 5 kW, on choisit un tube de quartz de 12 mm de calibre et de 6,5 cm entre les électrodes. Ce tube devait être refroidi par un courant d'eau et on peut le voir complété à la figure 4.

Les électrodes consistaient en deux tiges polies de tungsten contenant 5% de thoria et terminant en pointes de façon à ce que l'arc aboutisse à ces extrémités coniques. Leur forme était calculée de façon à remplir étroitement le tube de quartz et aux extrémités opposées à l'arc, elles étaient coiffées de feuilles de papier de molybdène qui, au moment du montage de l'appareil, avaient été scellées dans le vide entre le tube de quartz extérieur et le tube intérieur.

L'arc à gaz rare tel qu'il existe est un appareil à courant fort mais à tension faible. Avec une charge de 5 kW le courant est de l'ordre de 80 A et la tension de l'arc entre les électrodes de l'ordre de 65 V.

Parallèlement à ces travaux sur les lampes à arc à gaz de forme tubulaire, furent conduites des recherches expérimentales sur des lampes similaires fonctionnant au xénon et où le quartz est refroidi à l'air. Si l'on réduit la distance entre les électrodes à 15 mm environ, l'arc peut émettre une lumière de 25 000 bougies au cm² à peu près pour une charge de 3 kW.

PROPRIÉTÉS DE L'ARC À GAZ RARE

Le pouvoir éclairant d'un arc au xénon et à tube refroidi par l'eau est d'environ 30 l/W pour une charge de 5 kW.

Résumons les points caractéristiques de l'arc à gaz rare par rapport aux autres sources de lumière:

1. Couleur excellente (comparable à celle du jour).
2. Radiation pratiquement sans chaleur (grâce au refroidissement à l'eau).
3. Emission immédiate de la totalité de la radiation.
4. Concentration remarquable de la source de lumière (l'arc à gaz refroidi à l'eau et sous 5 kW a une luminosité moyenne de 5000 bougies/cm²).

De ces propriétés, la plus importante est peut-être que c'est une source lumineuse allumable et éteignable à volonté, dont la radiation a la qualité de la lumière du jour et qui atteint sa puissance maximum immédiatement.

Gay-Lussac (1778–1850), chimiste

K. R. WEBB

L'auteur décrit la jeunesse et la formation scientifique de Gay-Lussac. Celui-ci en collaboration avec Thénard découvre une méthode perfectionnée pour isoler les métaux alcalins, dégage le bore de l'acide borique et prépare les acides plus oxygénés des métaux alcalino-terreux: c'est au cours de ces derniers travaux que l'iode est définitivement classé comme élément et le cyanogène isolé. Suit un aperçu de l'apport considérable de Gay-Lussac à la technologie chimique et à la chimie analytique et expérimentale, puis une brève esquisse de son caractère d'après les témoignages contemporains.

Joseph-Louis Gay-Lussac naquit le 6 décembre 1778 à Saint-Léonard-le-Noblat, à environ 22 km de Limoges. Son père était procureur du Roi et possédait des terres dans le voisinage, à Lussac, dont il ajouta le nom à son nom de famille, Gay [2]. En raison des désordres dont la France était en proie à cette époque, l'enfant eut pour précepteur l'Abbé Bourdeix, jusqu'au moment où les ecclésiastiques furent proscrits; et ce n'est qu'en novembre 1794 qu'il put se rendre à Paris et commencer à se préparer pour l'examen d'admission à l'Ecole Polytechnique. A cette époque il était un adolescent fougueux et intrépide, qui plus tard, devenu un homme posé, étonnait ses amis par le récit de fredaines de collégiens [3].

Gay-Lussac

Les études de Gay-Lussac furent couronnées de succès: le 27 décembre 1797 il était admis à l'Ecole Polytechnique après avoir passé brillamment son examen. Il en sortit le 22 novembre 1800 ayant conquis tous ses diplômes, et trouvé en outre le temps de donner des lessons de mathématiques pour suppléer à l'insuffisance de l'allocation mensuelle de 60 francs que lui accordait l'Etat.

Il s'engage d'emblée sur la voie qui doit le mener à la gloire: d'abord assistant de Fourcroy, puis préparateur de Berthollet qui remarque son intelligence vive, Gay-Lussac passe au laboratoire privé de celui-ci à Arcueil où il commence ses recherches sur les propriétés physiques des gaz et des vapeurs. Il publie son premier mémoire en 1802 sur la dilatation des gaz sous l'effet de la chaleur. D'autres questions de physique retiennent son attention à cette époque, entre autres la pression des vapeurs, la thermométrie, l'hygrométrie, l'eudiométrie, et la mesure de la capillarité qu'il semble avoir été le premier à étudier en faisant usage du cathétomètre.

Au cours de l'année 1804, dans une intention purement scientifique, il entreprit avec Biot de sensationnelles expériences aérostatiques: leur but était de savoir si les forces magnétiques persistent au-dessus de la surface terrestre. La première ascension démontre qu'elles ne diminuaient pas jusqu'à 4000 m, le plus haut point que le ballon pût atteindre en emportant les deux hommes. Plus tard, le 16 septembre 1804, Gay-Lussac monta seul et dépassant 7000 m (un record pour cette époque) il obtint la confirmation des constatations précédentes et rapporta des échantillons d'air aux fins d'analyse.

Le 12 mars 1805 Gay-Lussac en compagnie d'Alexandre von Humboldt récemment revenu de son célèbre voyage en Amérique, partit de Paris pour une tournée scientifique en Italie et en Allemagne. Ils arrivèrent au début de juillet à Rome où le jeune savant eut l'avantage de rencontrer chez Wilhelm von Humboldt, chef de la

Légation de Prusse, diverses personnalités artistiques et scientifiques. Là, ayant un laboratoire à sa disposition il décèle la présence des fluorures à côté des phosphates dans les arêtes de poisson. Les voyageurs se rendirent ensuite à Naples, où le Vésuve, depuis quelque temps assoupi, s'était subitement réveillé, de sorte que Gay-Lussac, comme le dit un de ses compagnons, eut la bonne fortune d'assister à l'un des plus mémorables tremblements de terre qu'ait subis la région. Au retour il s'arrêtèrent à Florence, à Bologne et à Milan, où ils rendirent visite à Volta qui y vivait si modeste et inconnu qu'ils eurent quelque peine à le trouver. Arrivé à Berlin en novembre Gay-Lussac y passa l'hiver chez von Humboldt, et repartit pour Paris au printemps de 1806. Le 8 décembre de cette année il fut élu membre de l'Institut, succédant à Brisson le physicien-naturaliste.

En 1807 Gay-Lussac devint un des premiers membres d'une société scientifique très fermée, la Société d'Arcueil, fondée par son ancien protecteur Berthollet. Dans le second volume des *Mémoires* de cette Société se trouve une communication lue le 31 décembre 1808 où figure pour la première fois la loi de Gay-Lussac sur la combinaison volumétrique des gaz, une des pierres angulaires de la chimie théorique élémentaire.

Gay-Lussac et Biot pendant leur ascension en ballon.

Vers cette époque commença la fructueuse collaboration de Gay-Lussac avec Louis Jacques Thénard (1777–1857) [5] que nous retrouverons plus tard. En 1808 également il épousa Joséphine Rogeot qu'il avait connue comme vendeuse chez une lingère parisienne: il remarqua que cette jeune fille de 17 ans lisait à ses moments perdus un traité de chimie. Il se trouvait qu'en conséquence de la Révolution les études de Joséphine avaient été interrompues; Gay-Lussac s'occupa donc de les lui faire achever, puis ils se marièrent. L'union était des mieux assorties en dépit de la position encore modeste du jeune homme. Mais l'avancement ne devait pas tarder, car il devint bientôt professeur de physique à la Sorbonne et le 3 mars 1809 professeur suppléant de chimie pratique à l'Ecole Polytechnique puis, à la mort de Fourcroy, professeur en titre.

Gay-Lussac et Thénard avaient été des condisciples à l'Ecole Polytechnique depuis 1798. En 1808–9 ils commencèrent à collaborer, se proposant d'utiliser une énorme pile électrique, don de Napoléon lui-même, dans une tentative de surpasser la belle découverte des métaux alcalins faite par Davy en 1807. Toutefois, avant même que la pile eût été montée les deux Français découvrirent un autre moyen, alors plus efficace, de décomposer les alcalis par réduction en l'état fondu en présence du fer chauffé à blanc. En employant de potassium préparé de la sorte ils réduisirent l'acide borique, ce qui fit l'objet d'un mémoire préliminaire lu le 21 juin 1808. Ces travaux d'exploration comportaient des dangers; ainsi Gay-Lussac faillit perdre la vue à la suite d'une explosion provoquée par le potassium, et ses yeux en furent affectés de manière permanente. A la fin de 1808 ils avaient réussi à identifier un nouvel élément, le bore. Il faut ajouter que Davy

fit, de son côté, beaucoup de progrès dans ce domaine.

Outre les utilisations précitées des métaux alcalins, Gay-Lussac et Thénard étudièrent aussi leur oxydation et préparèrent leurs oxydes plus élevés, ainsi que ceux du barium et du calcium [5].

A cette époque aussi se place la fameuse controverse entre Gay-Lussac et Thénard d'une part et Davy de l'autre sur la nature du chlore, appelé alors acide muriatique oxygéné, étant supposé contenir de l'oxygène. Les expériences de Davy démontraient de manière concluante que ce gaz ne contenait pas trace d'oxygène, et qu'il se comportait comme un élément dans ses réactions. Les Français, partageant l'opinion de Lavoisier, selon laquelle l'acide muriatique devait contenir de l'oxygène comme principe acidifiant, pensaient que le chlore dégagé par l'oxydation de cet acide devait nécessairement contenir de l'oxygène. En définitive il devint évident que Davy avait raison, et ainsi disparut de la chimie la théorie de la nature oxygénée des acides [6].

En 1812 Courtois découvrit l'iode, le second des éléments halogènes à être isolé. Peu après la publication de cette découverte, le 29 novembre 1813, Davy et Gay-Lussac entamèrent, chacun de son côté, des recherches sur cette substance et ses dérivés. L'aboutissement de ces travaux fut le classement de l'iode comme élément, et au mois d'août 1814 Gay-Lussac était en mesure de présenter à l'Académie des Sciences ses «Recherches sur l'Iode» achevées. Il eut aussi sa part des premières études sur le fluor: en 1809 Thénard et lui furent les premiers à préparer un échantillon relativement pur d'acide fluorhydrique aqueux concentré. Scheele en 1771 [7] avait déjà obtenu la substance à l'état brut.

L'année 1815 vit deux réalisations importantes. Déjà en 1811 Gay-Lussac et Thénard avaient fait usage du chlorate de potasse comme oxydant dans l'analyse organique quantitative. A cette substance, qui s'était avérée plutôt dangereuse, Gay-Lussac substitua en 1815 l'oxyde de cuivre, plus maniable, surtout pour l'analyse des substances azotées. Bientôt après Döbereiner remplaça partout avec succès le chlorate par l'oxyde de cuivre. En 1815 également Gay-Lussac découvrit le cyanogène, le premier radical composé à être isolé. Depuis 1704 le bleu de Prusse avait été décrit: Scheele en avait obtenu par distillation en présence d'acide sulfurique en 1782 une solution aqueuse «d'un goût (!) et d'une odeur particuliers», que Lavoisier, Guiton de Morveau, Berthollet et enfin Fourcroy en 1787 appelèrent acide prussique [7]. En 1811 Gay-Lussac en obtint la forme anhydre en distillant du cyanure de mercure en présence d'acide chlorhydrique concentré, et en 1815 il isola le cyanogène lui-même par la décomposition du cyanure de mercure au moyen de la chaleur. Il démontra que le cyanogène, le chlore et l'iode se comportaient au point de vue chimique de la même façon.

L'année suivante (1816) parut son mémoire sur les oxydes d'azote où figure une importante description du bioxyde d'azote. Quelques années auparavant il avait déterminé la composition du bioxyde d'azote en faisant brûler du potassium métallique dans ce gaz. Trois ans après en collaboration avec Welter, il découvrit et étudia l'acide dithionique aqueux.

Vers cette époque Gay-Lussac se consacre de plus en plus aux perfectionnements ou aux modifications des procédés chimiques en usage dans la technologie. Depuis 1806 il est membre du Comité des Arts et Manufactures. En 1818 on lui donne la surintendance de la poudrière de l'Etat; en 1829, il est Essayeur principal à la Monnaie, puis en 1832, il prend la chaire de Chimie Générale au Musée d'Histoire Naturelle, abandonnant celle de Physique à la Sorbonne.

En 1821, Gay-Lussac démontre qu'on peut rendre le bois ininflammable en l'imprégnant de certains sels inorganiques, tels que le borax ou le phosphate d'ammoniaque, qui peuvent facilement se préparer en grandes quantités. La «tour» de Gay-Lussac destinée à capter les gaz nitreux au cours de la préparation de l'acide sulfurique en chambre de plomb date de 1827. C'est le résultat d'une inspiration subite de la part de Gay-Lussac. On dit en effet qu'il en eut l'idée un certain soir et que le lendemain matin, aidé d'un assistant nommé Lacroix, il en avait démontré, en petit, le fonctionnement [2].

Passons maintenant à l'œuvre considérable de Gay-Lussac en chimie analytique: elle est d'importance capitale, car c'est lui qu'on doit désigner comme le principal initiateur de la méthode volumétrique. En 1806 Decroisilles avait substitué l'analyse volumétrique à l'analyse gravimétrique pour le dosage des alcalis par les acides. Gay-Lussac, tout en conservant le principe, simplifia considérablement l'opération en inventant une éprouvette graduée, et appliqua la méthode non seulement aux titrages «acide-alcali» mais aussi au dosage du chlore dans la poudre à blanchir au moyen d'une solution d'acide arsénieux (1824, 1835), et plus tard au dosage de l'argent

au moyen d'une solution normale de chlorure de sodium (détails parus entre 1830 et 1840).

Gay-Lussac n'a écrit aucun traité général de chimie, bien qu'il ait publié environ cent-cinquante mémoires scientifiques. Deux volumes de ses cours de chimie provenant de notes sténographiées parurent néanmoins en 1828. Par le même procédé et à la même époque ses cours de physique aussi furent publiés.

Deux autres travaux méritent aussi une mention: la découverte de l'oxalate résultant des réactions mutuelles d'un alcali en fusion en présence du bois (1829), qui fut plus tard utilisée dans la fabrication de l'acide oxalique; et ses recherches sur les produits volatils dégagés de l'eau régale (1848), qui fournirent la matière de son dernier mémoire.

Gay-Lussac avait des conceptions très en avance sur son temps au sujet de l'état des sels en solution, lesquelles n'entrèrent dans la théorie de la chimie que vers la fin du 19e siècle, à la suite des travaux de van't Hoff et d'Arrhénius; on doit même le considérer comme le fondateur de la chimie-physique. Ces idées se trouvent dans son mémoire sur la cohésion publié en 1839.

Plusieurs contemporains nous ont laissé le portrait moral de Gay-Lussac. Berthollet lui disait à ses débuts: «Jeune homme, vous êtes appelé à faire des découvertes». Davy, en 1813, fait de lui cette esquisse lapidaire: «Doué d'un esprit prompt et alerte, ingénieux et profond, et d'une activité intellectuelle intense, Gay-Lussac est également un manipulateur très habile. Selon moi c'est le premier des chimistes français contemporains» [8]. De la part de Davy, un rival éminent, l'éloge n'est pas des moindres. Une autre opinion britannique est celle du toxicologue Sir Robert Christison qui assista aux cours de Gay-Lussac en 1820 et fut frappé de sa belle mine, de son abord affable et de sa voix douce en même temps qu'énergique. Selon Christison, ses cours étaient des modèles d'argumentation basée sur l'expérience, sériée, irréfutable [9].

De Ferguson qui n'est pas un contemporain, voici une autre appréciation, moins enthousiaste, mais plus impartiale: «Gay-Lussac était taciturne, persévérant et minutieusement précis; peut-être un peu froid et réservé, et conscient de sa valeur. Mais il savait être énergique et hardi non seulement dans ses travaux mais aussi pour défendre ou appuyer ses amis. L'endurance dont il fit preuve lors de ses accidents de laboratoire est un indice de la puissance de volonté qui l'aidait à affronter le risque de devenir aveugle et incapable de poursuivre les études scientifiques qui étaient sa vie même» [10].

Le 1er janvier 1850, Gay-Lussac tomba malade à Lussac où il se retirait souvent vers la fin de sa vie dans une maison pourvue d'un laboratoire et d'une bibliothèque. Deux mois après, au cours d'un mieux momentané, il fut transporté à Paris, où il mourut d'une crise cardiaque le 9 mai 1850 âgé de soixante-douze ans [2]. Tant que durera l'enseignement des principes de la chimie Gay-Lussac, au même titre que Lavoisier, Dalton, Berzélius et quelques autres sera préservé de l'oubli.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Read, J. «Humour and Humanism in Chemistry». Londres, 1947.

[2] Michaud, L. G. «Biographie Universelle» (Volume 16). Paris, 1856.

[3] Tilden, Sir W. A. «Famous Chemists — The Men and Their Work». Londres, 1921.

[4] Weeks, M. E. «Discovery of the Elements». Easton, Pa., 1945.

[5] Webb, K. R. *Chem. and Ind.*, 2, 1945.

[6] Ladenburg, A. (traduit par L. Dobbin). «History of Chemistry». Londres, 1900.

[7] Webb, K. R. *Chem. and Ind.*, **62**, 139, 1943.

[8] Tilden, Sir W. A. *Op. cit.*

[9] Partington, J. R. *Nature*, **165**, 708, 1950.

[10] Armitage, F. P. «A History of Chemistry». Londres, 1928.

Revue des livres

AGRICULTURE

PURI, A. N. *Soils, their Physics and Chemistry* (Aspects physiques et chimiques des sols). Avec un avant-propos de Firman E. Bear. Pp. xv + 550 et des diagrammes linéaires. Reinhold Publishing Corporation, New York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1949. 56s.

Ce livre n'est pas un manuel comme le suggère son titre. C'est au contraire une étude extrêmement détaillée et offrant une vue nouvelle et indépendante de la question. Elle représente en cela une contribution bien venue aux progrès de la science des sols et peut-être la plus remarquable jusqu'à ce jour de la science hindoue aux connaissances mondiales. Dans sa préface, le Dr Puri rejette le nom de traité et répète que son ouvrage s'adresse aux étudiants. C'est là une chose difficile à accepter car ses conceptions ne sont pas classiques et, bien qu'elles simplifient les problèmes de cette science pour les étudiants, doivent encore recevoir une approbation unanime avant de pouvoir être enseignées avec sécurité.

On admet, certes, avec le Dr Puri que la science orthodoxe des sols est obscure, incomplète et trop souvent vague. Documents à l'appui, il plaide avec éloquence pour la cause de principes plus simples, plus fondamentaux. Si nos principes actuels peuvent au mieux fournir des résultats d'analyse à interpréter empiriquement, ne vaut-il pas mieux repartir d'un pied nouveau? Les jeunes chercheurs ont, pour la plupart, conscience de ces faiblesses et applaudiront à cet essai d'unification.

Au point de vue chimique, le Dr Puri considère tous les sols comme des acides pouvant donner des sels; il nomme ces sels «saloïdes» et les sols naturels sont des mélanges de saloïdes venant des «acidoïdes» du sol. Leur comportement chimique suit les lois de la stœchiométrie ordinaire. Les saloïdes étant des sels d'acides faibles sont naturellement enclins à l'hydrolyse; ainsi, les régions sèches auront tendance à avoir des sols alcalins et celles qui sont fortement arrosées des sols acides. L'auteur est sûr que les recherches sur les sols doivent être centrées sur l'hydrogène échangeable des acidoïdes. Il rejette la notion d'adsorption en particulier pour l'ion de phosphate et offre une explication purement chimique de la nitrification des nitrites.

Il reste à voir si les simplifications du Dr Puri seront finalement acceptées. D'aucuns se résigneront à l'idée que la science des sols, comme la médecine, ne peut être qu'une science inexacte. Il n'en est pas moins extrêmement désirable que tous les chercheurs de la question étudient de près cet ouvrage.

D. P. HOPKINS

BIOGRAPHIE

WILLSTÄTTER, RICHARD. *Aus meinem Leben* (Mémoires de ma vie). Publié par Arthur Stoll. Pp. 453 et 49 illustrations. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstrasse, 1949. 28 marks.

Avec Richard Willstätter qui mourut en 1942 près de sa soixante-dixième année, disparut un des derniers grands représentants de la chimie organique allemande. Il venait en ligne droite de Justus v. Liebig et de son élève A. von Kekulé, d'Adolf von Baeyer et d'Emil Fischer, tous pionniers. Peu survivent de sa génération; son successeur à l'Université de Munich, H. Wieland est proche de la retraite et Hans Fischer, autre grand chimiste organique munichois est mort.

Les mémoires de Willstätter, écrits pour la plupart en exil en Suisse ont été soigneusement rassemblés et édités par l'ami et le collaborateur fidèle de nombreuses années, Arthur Stoll. Ses travaux scientifiques ne sont pas mis au premier plan dans cet ouvrage, qui est plutôt un apport à la vie culturelle et scientifique européenne. La carrière distinguée de Willstätter, qui débuta à Munich sous le grand maître Adolf von Baeyer, se continua par la riche période scientifique de Zurich et quelques années à Berlin-Dahlem. Elle se termina en 1924 à Munich également où — cette fois comme successeur de Baeyer — il démissionna volontairement bien avant la venue d'Hitler au pouvoir pour protester contre la discrimination raciale. Willstätter poursuivit néanmoins ses travaux sur les enzymes avec sa collaboratrice fidèle, le Dr Margarete Rohdewald jusqu'en 1939 où il chercha refuge en Suisse contre la menace d'une persécution insupportable.

Cette autobiographie du grand savant ne respire aucune amertume mais bien l'amour patriotique d'un bon Allemand. Richard Willstätter était membre étranger de la *Royal Society* et Lauréat du Prix Nobel et ses travaux sur les alcaloïdes, la chlorophylle, les anthocyanines et les enzymes seront encore fameux lorsque les noms odieux de ses persécuteurs seront depuis longtemps oubliés.

P. ROSBAUD

BIOLOGIE

GAUTHERET, R.-J. *La Cellule: Principes de Cytologie générale et végétale.* Pp. 404. Albin Michel, Paris. 1949. 960 frs.

Cet excellent volume se révèlera particulièrement utile à une période où tant d'intéressantes recherches sur la cellule sont conduites par des chercheurs n'ayant qu'un mince bagage de connaissances cytologiques. Le champ de la cytologie est entièrement traité sans insistance spéciale sur aucun aspect particulier. Le livre est unique en cela parmi les manuels modernes sur le sujet. Il n'est pas possible dans un ouvrage de taille moyenne de s'attarder sur des points spéciaux sans rompre l'équilibre et l'auteur a soigneusement évité ce défaut. Quelques portions du livre ne rencontreront peut-être pas l'approbation des spécialistes. Ainsi, l'exposé de la microscopie à phases contrastées n'est pas entièrement satisfaisant et la description du noyau interphasé sera critiquée par certains. Mais dans l'ensemble le texte est sûr, les points douteux sont traités avec habileté, il n'y a pas de place perdue dans la discussion d'hypothèses et l'exposé tout entier est un exemple admirable de clarté et de logique françaises.

Nombreux sont les cytologistes ayant un point de vue soit botanique soit zoologique; beaucoup étudient le noyau ou le cytoplasme. La largeur de vue et la sûreté de jugement du Professeur Gautheret auront l'heureux effet de faire un tout de ce qui devrait être une seule science.

JOHN R. BAKER

BOTANIQUE

SIR EDWIN BUTLER et S. G. JONES. *Plant Pathology* (Pathologie végétale). Pp. xii + 979 et 435 dessins et demi-teintes. Macmillan and Company Limited, Londres. 1949. 63s.

S'il y avait un homme ayant la largeur de vue et l'expérience nécessaires pour couvrir le terrain tout entier de la pathologie végétale, c'était bien Sir Edwin Butler. Dans son œuvre précédente, *Fungi and Disease in Plants*, publiée aux Indes en 1918, une section générale sur la morphologie, la nutrition et la pathogénèse des mycètes précédait l'étude de maladies des plantes cultivées orientales. Et le livre

actuel fut d'abord entrepris comme révision du texte de 1918, mais fut par la suite transformé en livre nouveau où les maladies des plantes de Grande-Bretagne remplacèrent celles des plantes tropicales.

Avant sa mort en 1943, Sir Edwin avait presque terminé la partie principale de l'ouvrage que l'on reconnaît à la sûreté de main dans l'étude des relations entre l'hôte et le mycète et de l'influence du milieu dans le parasitisme. Suit une revue générale des désordres des plantes causés par les virus et les carences de la nutrition.

Dans les deux-tiers restant du volume, le Dr S. G. Jones décida de grouper les maladies spécifiques selon les récoltes qu'elles attaquent et non d'après la disposition systématique des microbes pathogènes. Les maladies choisies comprennent non seulement celles des céréales, des plantes fourragères, des racines, des légumes et des fruits, mais des plantes ornementales et des arbres forestiers. Les exemples couvrent un vaste terrain géographique mais les maladies communes en Grande-Bretagne ont la première place.

Il est bien possible que, dans un sujet aussi morcelé par la spécialisation, ce livre représente un des derniers efforts d'unification. En raison même de sa nature, une synthèse de ce genre compte naturellement de nombreuses fautes de détail mais l'ensemble n'en reste pas moins une réalisation remarquable. Sa publication longuement attendue couronne splendidement la tâche du savant qui a si largement influencé le cours de la pathologie végétale dans tout l'Empire britannique. R. W. MARSH

CARTOGRAPHIE

TROREY, LYLE G. *Aerial Mapping and Photogrammetry* (Cartographie et photogrammétrie aériennes). Pp. 178, avec de nombreux diagrammes linéaires et en demi-teintes. Cambridge University Press, Londres. 1950. 25s.

Le Dr Trorey a une expérience considérable des levés de terrain à partir de photographies aériennes et son livre est d'autant plus utile qu'il aborde le sujet d'un angle pratique. Il est presque entièrement consacré à des travaux d'échelle topographique et comprend des explications et des diagrammes en grand nombre, en particulier des méthodes graphiques employées en cartographie. Les machines modernes à relever, qui sont automatiques, ne sont pas entièrement négligées car le chapitre sur l'équipement Multiplex est à la fois instructif et bien écrit. Les appareils autres que Multiplex utilisant les méthodes d'intersection dans l'espace ne sont toutefois que très brièvement traités.

On trouve des renseignements sur les méthodes utilisées au Canada et généralement inconnues en Grande-Bretagne. La partie traitant des photographies en oblique est particulièrement intéressante.

La publication de cet ouvrage se révèle très opportune à une période où il y a tant d'innovations dans les procédés d'arpentage du sol. On a cependant l'impression que le livre n'a été publié qu'assez longtemps après l'achèvement du manuscrit, car certains détails ont trait à des méthodes et à des appareils qui ne sont plus considérés économiques, des moins au point de vue commercial, dans la cartographie aérienne.

E. A. MISKIN

CHIMIE

PENN, W. S. *High Polymeric Chemistry* (Chimie des hauts polymères). Pp. 487 et diverses illustrations linéaires et en demi-teintes. Chapman and Hall Limited, Londres. 1949. 36s.

Ce livre sur les hauts polymères est, comme les ouvrages similaires paraissant en ce moment, destiné à combler le vide entre les études technologiques sur les plastiques et les monographies physico-chimiques sur les molécules longues. Les volumes de Mark et de Mark-Raff dans la série *Interscience* furent les premiers manuels généraux sur le sujet et plus récemment en Grande-Bretagne, Bawn et Ritchie publièrent séparément une étude générale plus poussée de la chimie des polymères.

Le livre de M. Penn suit de très près ceux de Ritchie et de Mark-Raff pour le contenu et expose de façon qualitative la chimie générale et organique des polymères. Ce point de vue peut fournir de bons livres — tel celui de Ritchie — mais il n'en est malheureusement pas le cas ici. Il est curieux de remarquer que le contenu est à jour mais l'exposition démodée. La plupart des sujets reliés aux polymères sont traités, dont beaucoup, comme le caoutchouc synthétique «froid» GR–S, ne sont actuels que depuis peu, mais leur étude est étrangement en retard et même assez floue. D'après les références, le livre semble avoir été écrit dans la période 1945–7 et pourtant les idées semblent appartenir davantage à 1940. L'étendue des références académiques et industrielles est très vaste et c'est peut-être la cause de cette atmosphère désuète car on a peu fait pour élaguer de nombreuses théories ou expériences anciennes, inexactes et rejetées depuis longtemps. Cela s'applique en particulier aux chapitres de début sur les mécanismes et les méthodes qui devraient être importants et sont très décevants. Beaucoup de généralisations trop vagues ont un effet irritant à la longue. Un livre malencontreux.

R. F. TUCKETT

SMITH, S. J. *Advanced Chemical Calculations*. Pp. 454. Macmillan and Company Limited, Londres. 1950. 17s.

Ce livre, qui fait suite aux «*Introductory Chemical Calculations*», s'adresse aux étudiants de niveau intermédiaire et avancé. Il omet les problèmes ne se prêtant pas à une solution mathématique relativement simple ou ne demandant que des substitutions dans les formules. Un très grand nombre d'exercices tirés pour la plupart de questionnaires d'examens et avec leurs solutions rendront le livre très utile aux étudiants et aux professeurs. Les méthodes sont expliquées dans certains cas et dans d'autres il faut se rapporter aux ouvrages cités. On y trouve les calculs de chimie organique mais les méthodes pour la détermination de structure ne sont pas expliquées. La thermodynamique et l'électrochimie font partie du programme de chimie physique et le livre utilise la nomenclature et les symboles américains dans le premier cas, mais la convention européenne de potentiel d'électrode dans le second. Le texte est dans l'ensemble satisfaisant bien que la difficile question du potentiel de contact liquide, épineuse pour la plupart des étudiants, ne soit pas très bien traitée et même ignorée dans certains cas où elle devrait être envisagée. Les éditions à venir corrigeront sans doute quelques erreurs de détail. C'est là un livre très utile, car tous les professeurs reconnaissent la nécessité d'exercices numériques pour vraiment comprendre la chimie physique. J. R. PARTINGTON

COLMAN, JOHN S. *The Sea and its Mysteries* (La mer et ses secrets). Pp. 285, et de nombreux dessins et illustrations en demi-teintes. G. Bell and Sons Limited, Londres. 1950. 12s. 6d.

La mer est un immense élément à trois dimensions et l'océanographie qui l'étudie fait partie de toutes les autres sciences depuis l'astronomie (en raison des marées) jusqu'à la bactériologie.

De nos jours il n'est guère possible d'avoir une connaissance détaillée de plus d'une ou deux de ces sciences, et même le spécialiste verra toute question d'un point de vue physique ou biologique. Toute étude générale de la mer reflètera donc la préoccupation dominante de l'auteur. M. Colman est zoologiste, comme le lecteur, s'en rendra vite compte mais son livre est remarquablement bien proportionné. Les chapitres de début traitent de physique et de chimie et bien qu'ils doivent certainement beaucoup à l'ouvrage de Sverdrup, Johnson et Fleming: «*The Oceans*», ils contiennent aussi le premier exposé de vulgarisation sur l'étude récente des vagues.

M. Colman parle avec l'autorité d'une expérience extrêmement vaste quand il en vient à traiter de la biologie marine. Il a étudié personnellement le plankton tropical, a travaillé sur les récifs de corail de la Grande Barrière Australienne et aux Antilles a fait d'importants apports à l'étude des zones intercotidales sur les côtes américaines et britanniques et a enfin sondé l'océan sous de nombreuses latitudes. Son texte reflète tout cela et — qualité rare dans les livres pour tous — donne l'impression d'un savoir de première main. Une série de planches excellentes et de nombreuses figures dans le texte illustrent le livre. Les animaux des profondeurs sont particulièrement bien représentés. Un livre excellent.

C. M. YONGE

PHYSIOLOGIE

HARTRIDGE, HAMILTON. *Recent Advances in the Physiology of Vision.* Pp. 412. J. and A. Churchill Limited, Londres. 1950. 25s.

Comme le remarque l'auteur dans sa préface, cinq ouvrages importants ont été publiés dans les cinq dernières années sur ce sujet. M. le Professeur Hartridge, directeur de la section de recherches sur la vue au *Medical Research Council* y ajoute une revue des travaux publiés récemment, commente sur les théories de ses auteurs et parfois offre alternativement ses propres interprétations. Le livre se divise en huit principaux chapitres dont chacun traite en général d'une fonction différente de l'œil, comme par exemple les fonctions de la rétine, la perception des formes et des grandeurs, celle de la couleur et les théories de la vision des couleurs. D'autres chapitres sont consacrés à la neurologie de la vision, aux propriétés des diverses parties de l'œil, à la perception de la lumière et de la couleur et à quelques propriétés essentielles de la vue.

Dans la description des expériences et de leurs résultats, M. le Professeur Hartridge écrit avec toute sa lucidité usuelle; mais dans la discussion de théories, l'impartialité demande que tous les points de vue soient exposés et la façon dont il les expose fait que le tableau d'ensemble n'est pas toujours très net car les théories (celles de la vision des couleurs, par exemple) sont souvent assez nombreuses. Une des intentions expresses de l'auteur est d'encourager la recherche en nous montrant les lacunes de nos connaissances. Le livre sera donc très utile au chercheur de laboratoire et au spécialiste. Il le sera moins pour l'étudiant, qui n'aurait déjà quelque connaissance du sujet.

La nature d'un grand nombre des problèmes restant à résoudre conduit à penser qu'une application intensive des techniques délicates rendues possibles par les développements de l'électronique et de la physique nucléaire permettra des progrès remarquables.

J. M. M. PINKERTON

ZOOLOGIE

GRASSÉ, PIERRE-P. *Traité de Zoologie* (*Anatomie, Systématique, Biologie*) publié sous sa direction. Tome VI Onychophores, Tardigrades, Arthropodes (généralités), Trilobitomorphes, Chélicérates. Tome IX Insectes (Paléontologie, Géonémie, Insectes inférieurs et Coléoptères). Tome XV Oiseaux. Masson et Cie., Paris. 1949–50. 5000 francs, 4500 francs et 6000 francs respectivement.

Le premier volume de cette série à paraître était d'un niveau très élevé, pour la présentation comme pour le fond. Ces trois dernières additions le maintiennent et même le dépassent. Elles sont aussi bien présentées et imprimées que le volume précédent et rehaussées de splendides planches en couleurs, en particulier le volume VI, et de photographies nettes et bien imprimées au volume XV. Le luxe de la présentation a malheureusement causé une augmentation inévitable de prix. Il est toutefois agréable de voir les volumes paraître si rapidement car certaines parties d'un tel ouvrage se démodent naturellement en très peu d'années et les premiers volumes de la série seraient dépassés avant même que l'œuvre ne soit complétée.

Chaque partie est une fois de plus écrite par un expert éprouvé de la question, et le résultat est un ouvrage universel couvrant la plupart des aspects possibles de l'anatomie et de l'évolution des groupes animaux avec d'intéressantes discussions sur leur parenté et leur histoire passée. C'est une chose particulièrement utile dans l'étude générale de l'embranchement des Arthropodes au volume VI et dans l'examen de l'ensemble des groupes ayant des affinités douteuses dont le reste du même volume est composé. La théorie de la dérivation des continents est introduite avec raison dans la partie sur la paléontologie, et la distribution des insectes et les diverses explications de l'origine du vol des oiseaux sont exposées d'une façon très complète.

C'est dans le caractère presque trop complet de ces volumes que réside leur défaut, si défaut il y a. Ecrire une histoire complète des ordres animaux avec description entière de leur comportement, de leur embryologie, de leur physiologie, de leur œcologie et de leur importance économique serait une tâche monumentale. Certaines sections du plan doivent être condensées. La place d'honneur revient naturellement à l'anatomie animale et les autres sections se placent selon leur importance dans le schéma général du règne animal et les connaissances qu'on a sur elles. L'équilibre est conservé dans l'ensemble et le volume XV en est un excellent exemple. Nous y trouvons une description détaillée et au point de l'embryologie expérimentale des oiseaux ainsi qu'une revue de l'énorme quantité de travaux sur leur comportement et leurs cycles reproductifs. Il y a de plus un bref exposé du vol des oiseaux, du mécanisme de leur squelette en général et de tous les détails morphologiques et historiques du groupe. Les sections non-morphologiques sont parfois presque trop concises comme la migration des oiseaux, la cuticule des insectes et la stridulation des sauterelles. Il faut admettre cependant que leur brièveté tient à ce qu'elles représentent la meilleure sélection des travaux les plus modernes, cités dans les références pour ceux qui voudraient s'informer de façon plus poussée. Le lecteur est naturellement libre de juger de l'importance des divers chapitres.

Comme ouvrage standard de références générales, ces volumes ont une place unique et l'on oublie aisément leurs quelques fautes d'impression, souvent amusanten, et les renvois dans le texte parfois obscurs.

J. D. CARTHY

Livres reçus

(*Note.* La mention à cette page n'exclut pas la possibilité de revue ultérieure.)

AGRICULTURE

BUTTRESS, F. A. *Agricultural Periodicals of the British Isles* 1681–1900, *and their Location.* Réunis par, Pp. 16. School of Agriculture, University of Cambridge. 1950. 2s.

ASTRONAUTIQUE

CLARKE, A. C. *Interplanetary Flight* (Vol interplanétaire). Pp. 164 avec de nombreux dessins et illustrations en demi-teintes. Temple Press Limited, Londres. 1950. 8s. 6d.

ASTRONOMIE

JOHNSON, MARTIN. *Astronomy of Stellar Energy and Decay* (Astronomie de l'énergie et de l'épuisement stellaires). Pp. 216, avec des dessins et illustrations en demi-teintes. Faber and Faber Limited, Londres. 1950. 16s.

BIOLOGIE

BIOCHEMICAL SOCIETY, CONFÉRENCES No. 5. *Biological Oxidation of Aromatic Rings.* Pp. 96 avec de nombreux tableaux et diagrammes linéaires. Cambridge University Press, Londres. 1950. 8s.

COLD SPRING HARBOR, CONFÉRENCES DE BIOLOGIE QUANTITATIVE. *Amino Acids and Proteins.* Pp. 217, avec de nombreux dessins et illustrations en demi-teintes. The Biological Laboratory, Cold Spring Harbor, U.S.A. 1950. 7 dollars.

EDITIONS DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE. *Unités Biologiques douées de Continuité Génétique.* Pp. 199 avec de nombreux dessins et figures en demi-teintes.

GILBERT, FRANK A. *Mineral Nutrition in Plants and Animals.* Pp. 131 avec de nombreuses illustrations en demi-teintes. Hutchinson's Scientific and Technical Publications, Londres. 1950. 12s. 6d.

WILLIAMS, R. T. *Biochemical Aspects of Genetics.* Pp. 60. Cambridge University Press, Londres. 1950. 6s.

BOTANIQUE

CHILEAN IODINE EDUCATIONAL BUREAU. *Iodine and Plant Life* (L'Iode et la vie végétale). Bibliographie 1813–1949. Pp. 1111. Londres. 1950.

KING, E. J. *The Propagation of Plants* (La Multiplication des plantes). Pp. 264 et de nombreux diagrammes linéaires. Hutchinson's Scientific and Technical Publications, Londres. 1950. 16s.

SCHOPFER, W. H. *Plants and Vitamins.* Pp. 293 avec des dessins linéaires et en demi-teintes. Chronica Botanica Company, Waltham, Mass., U.S.A. 1950. 5 dollars.

CHIMIE

DYSON, G. MALCOLM. *A Manual of Organic Chemistry for Advanced Students.* Pp. 984 avec divers tableaux et diagrammes linéaires. Longmans, Green and Company Limited, Londres. 1950. 63s.

HAMILTON, C. S. *Organic Syntheses, Vol.* 29. Pp. 119. John Wiley and Sons Inc., New York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1950. 20s.

HARNED, HERBERT S., et OWEN, BENTON B., *The Physical Chemistry of Electrolytic Solutions* (2e édition). Pp. 645, avec divers diagrammes linéaires. Reinhold Publishing Corporation, New York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1950. 80s.

PARTINGTON, J. R. *A Textbook of Inorganic Chemistry* (Manuel de chimie minérale). Pp. 996 et de nombreux diagrammes linéaires. Macmillan and Company Limited, Londres. 1950. 25s.

SULLIVAN, WILLIAM H. *Trilinear Chart of Nuclear Species* (Tableau trilinéaire des espèces nucléaires). Partie artistique de Kay Benscoter. John Wiley and Sons Inc., New York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1949. 20s.

ZECHMEISTER, L. *Progress in Chromatography.* 1938–1947. Pp. 368, avec des diagrammes linéaires et en demi-teintes. Chapman and Hall Limited, Londres. 1950. 45s.

INDUSTRIE

FISK, NEIL R., et BOWRON, H. W. *The Paint Industry in Germany during the Period* 1939–1945. Pp. 153 et des diagrammes linéaires et en demi-teintes. British Intelligence Objective Sub-committee Surveys Report No. 22. H.M. Stationery office, Londres. 1950. 3s.

MÉDECINE

THE WELLCOME HISTORICAL MEDICAL MUSEUM. *Medicine in* 1850 (*Catalogue of an Exhibition*). Pp. 64 et plusieurs illustrations en demi-teintes. Oxford University Press, Londres. 1950. 3s.

PHYSIQUE

CRAMMER, J. L., et PEIERLS, R. E. *Atomic Energy.* Pp. 200, avec plusieurs diagrammes linéaires et en demi-teintes. Penguin Books Limited, Londres. 1950. 1s. 6d.

DINGLE, HERBERT. *Practical Applications of Spectrum Analysis.* Pp. 245 avec plusieurs diagrammes linéaires et en demi-teintes. Chapman and Hall Limited, Londres. 1950. 40s.

ELECTRONICS GROUP, Organisateurs de la session. *The Acceleration of Particles to High Energies* (Accélération des particules jusqu'à des énergies élevées). Pp. 58 et de nombreuses illustrations linéaires et en demi-teintes. Institute of Physics, Londres. 1950. 10s. 6d.

GAYNOR, FRANK. *Pocket Encyclopaedia of Atomic Energy.* Pp. 204 et de nombreux diagrammes linéaires. The Philosophical Library, New York. 1950. 7,5 dollars.

LEVERENZ, HUMBOLDT, W. *An Introduction to the Luminescence of Solids.* Pp. 569 et de nombreux diagrammes linéaires. John Wiley and Sons Inc., New York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1950. 96s.

SYRKIN, Y. K., et DYATKINA, M. E. *Structure of Molecules and the Chemical Bond* (Structure des Molécules et le Lien chimique). Pp. 509 avec de nombreuses illustrations linéaires et en demi-teintes. Butterworth's Scientific Publications, Londres. 1950. 63s.

SCIENCE GÉNÉRALE

CRAMMER, J. L. *Science News No.* 16. Pp. 176 avec de nombreux dessins et demi-teintes. Penguin Books Limited, Londres. 1950. 1s. 6d.

CROMBIE, A. C. *The British Journal for the Philosophy of Science* (*Volume* 1, *No.* 1). Pp. 76. Thomas Nelson and Sons Limited, Londres. 1950. 7s. 6d.

LENARD, PHILIPP. *Great Men of Science* (Grands savants) (Réédition). Traduit de la deuxième édition allemande par H. Stafford Hatfield. Pp. 389 et de nombreuses illustrations en demi-teintes. G. Bell and Sons Limited, Londres. 1950. 15s.

ZOOLOGIE

HEDIGER, H. *Wild Animals in Captivity.* Pp. 207 avec de nombreux dessins et illustrations en demi-teintes. Butterworth's Scientific Publications, Londres. 1950. 35s.

NOBLE, N. S. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* (*Vol.* 1, *No.* 1). Pp. 154 avec de nombreux dessins et illustrations en demi-teintes. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne. 1950. 7s. 6d.